

コンクリート構造物の補修・補強に関するフォーラム2019
～鉄筋防錆の観点からコンクリート構造物の健康寿命を考える～

コンクリート構造物の 電気防食工法の性能確保のための取組み

東北大学大学院 准教授 皆川 浩

講演の内容

～鉄筋防錆の観点からコンクリート構造物の健康寿命を考える～

➤ PCポステンT桁橋のライフサイクルコストの試算例

⇒ LCCの影響要因は？ ～ 環境条件？ 工法？

➤ 電気防食工法の信頼性の確保に向けた取組み

⇒ 撤去PC桁の調査事例※

※共同研究

土木研究所

東北大学

日本エルガード協会

コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会

PCポス텐T桁橋のライフサイクルコストの試算例

⇒ LCCの影響要因に関する考察

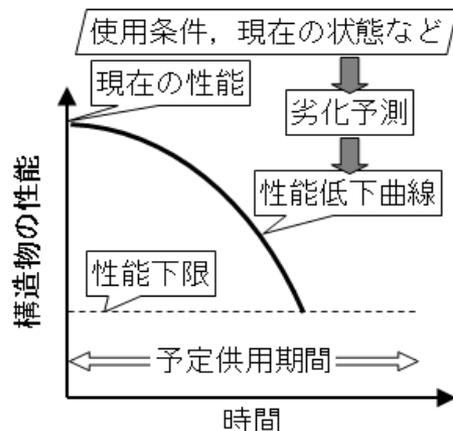
※詳細はJCI東北支部の研究員会報告書にも記載されています。

コンクリート構造物のLCC評価研究委員会

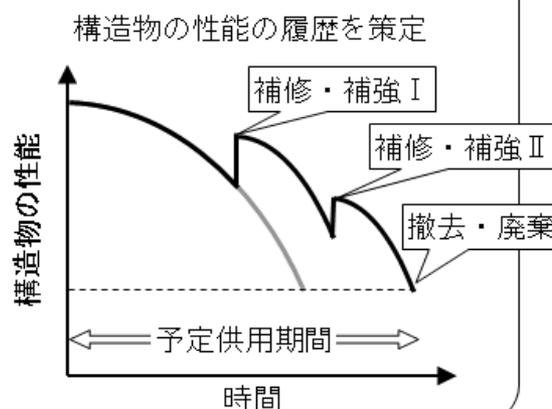
https://docs.wixstatic.com/ugd/c8e834_3706dbe8bfdd4e4c8c57cfd14e9940c8.pdf

背景 LCC評価のポイント = 劣化予測

性能低下曲線の作成

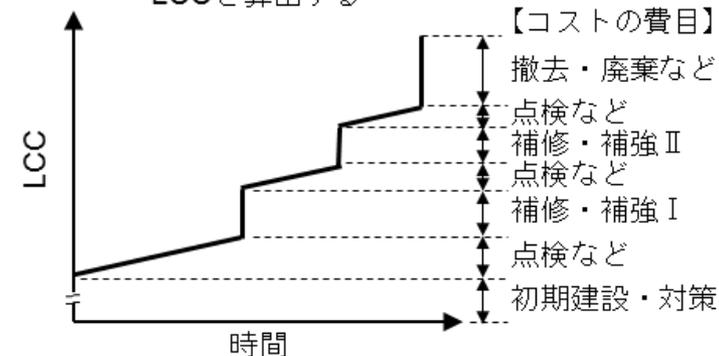


ライフサイクルデザイン



LCCの積算

各イベントで発生する費用を積算して
LCCを算出する



イベントの発生時期を**劣化予測**により評価し, 維持管理方針, 目標性能水準, 維持管理シナリオを考慮して構造物の性能の履歴を策定する (ライフサイクルデザイン)

イベント毎の**費用**の算出

↓
積算

↓
LCCの算出

LCC評価のポイント: どれだけ費用がどの時期に発生し得るかを適切に予測する = 中核要素技術の**劣化予測手法の信頼性確保**

本研究の目的と構成

対象構造物：日本海沿岸PC橋梁上部工
劣化の種類：海洋からの飛来塩分による塩害劣化

劣化予測

劣化予測手法の構築

- ✓ 客観的・定量的な既存の工学モデルを組み合わせることで各劣化過程の期間を算出
- ✓ 既存構造物の実際の劣化の推移と比較

シリオ作成

LCC評価

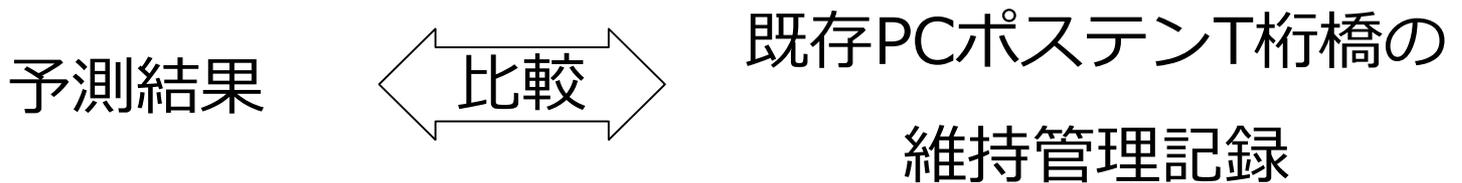
劣化予測手法の信頼性を確保

ケーススタディーの実施 ～ 対象：PCポステンT桁橋

- ✓ 塩害対策工法の経済的優位性の確認
- ✓ 環境条件の相違や補修工法がLCCに及ぼす影響の評価

概要

1. 3つの劣化予測手法を構築（工学モデルに基づく）
2. 潜伏期～進展期～加速期～劣化期を予測
3. 劣化予測手法の妥当性の検証



4. 最も確からしい劣化予測手法を用いて維持管理シナリオ作成
5. LCCの評価

劣化過程の定義

劣化予測 ⇒土木学会示方書の劣化過程の期間を算出
 ⇒構造物の性能はスターラップの腐食量で評価

劣化過程	劣化過程の期間の定義	健全度
潜伏期	かぶり位置の全塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度に達するまでの期間	5
進展期	鋼材腐食が発生し、腐食ひび割れが発生するまでの期間	4
加速期 (前期)	腐食ひび割れ発生からはく離・はく落発生までの期間	3
加速期 (後期)	最外縁の鋼材の断面減少率が10%に達するまでの期間	2
劣化期	最外縁の鋼材の断面減少率が20%に達するまでの期間	1

※最外縁の鋼材の断面減少率が20%以上になると供用限界に達していると判定

劣化予測の構築（潜伏期）

【潜伏期】

- ✓ かぶり位置の全塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度に達するまでの期間

◆ 鋼材の腐食発生条件

A・B・C手法共通

鋼材位置における塩化物イオン濃度 C_d が

腐食発生限界塩化物イオン濃度 $C_{lim} = 1.2 \text{ kg/m}^3$ に達した時

（土木学会コンクリート標準示方書）

劣化予測の構築（潜伏期）

◆かぶり位置の塩化物イオン濃度の算出方法（塩分浸透予測）

A・B・C手法共通

Fickの拡散則
$$C_d = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{c}{\sqrt{D_d}} + \frac{C_{ep}}{\sqrt{D_{epd}}} \right) \right) \right)$$

示方書式
$$\log_{10} D_d = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5$$

C_d : 鋼材位置における塩化物イオン濃度 (kg/m³)

C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)

erf : 誤差関数, c : かぶり (mm) , t : 供用開始からの年数 (年)

D_d : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm²/年) , W/C : 水セメント比

c_{ep} : 表面被覆材またはエポキシ樹脂塗膜の厚さ (mm)

D_{epd} : 表面被覆材, エポキシ樹脂塗膜内へのCl⁻の侵入を拡散現象とみなした場合の塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm²/年)

劣化予測の構築（進展期）

【進展期】

- ✓ 鋼材腐食が発生し，腐食ひび割れが発生するまでの期間

◆腐食ひび割れの発生条件

A手法

鋼材の断面減少率が鋼材表面積あたりの腐食深さで **10 mg/cm²**に相当する値に達したとき（JSCE338, 2009）

B手法

C手法

鋼材の断面減少率が次式の腐食量に達したとき（JCI,1992）

$$W_{cr} = \frac{0.02d}{3D}$$

W_{cr} ：腐食ひび割れを発生させる鋼材の腐食量（g/cm²）

d ：かぶり（cm）， D ：鉄筋径（cm）

劣化予測の構築（進展期）

◆ 鋼材の断面減少率の算出方法

A手法 次式で算出する質量減少率の累積値（松林ら,2000）

$$q = 0.092 \cdot e^{\{(0.0423 \cdot W/C - 1.5091) \cdot Cl^-\}} \cdot \frac{1}{\sqrt{c}}$$

q : 腐食による鋼材の質量減少率（%/年）, W/C : 水セメント比
 e : ネイピア数, Cl^- : 鋼材表面の全Cl濃度（kg/m³）, c : かぶり（mm）

B手法 **C手法** 腐食電流密度式と腐食量の累積値（川島ら,2006）

$$W_{spe} = k \cdot \frac{i}{2F} \times [Fe(OH)_3^-] \times t_{corr}$$

$$k = 1.0 \quad 3 \times D \geq d$$

$$k = 3 \times \frac{D}{d} \quad 3 \times D < d$$

$$i = 0.025 \times C(d,t)^{1.5}$$

W_{spe} : 腐食量（g/cm²）, D : 鋼材径（mm）

d : かぶり（cm）, i : 腐食電流密度（μA/cm²）

$C(d,t)$: かぶり d および時刻 t におけるCl濃度（kg/m³）

F : ファラデー定数

$[Fe(OH)_3^-]$: 水酸化鉄(III)の分子量

t_{corr} : 腐食発生限界塩化物イオン濃度を上回った時点からの経過時間（秒）

劣化予測の構築（加速期-前期）

【加速期-前期】

✓ 腐食ひび割れ発生からはく離・はく落発生までの期間

◆はく離・はく落の発生条件

A・B・C手法共通

鋼材の腐食量が次式の腐食量に達したとき（鳥取ら，2005）

$$\Delta r_{sp} = 56 \left(\frac{c}{\phi} \right) \times 10^{-3}$$

Δr_{sp} : はく離・はく落を発生させる鋼材の腐食深さ (mm)

c : かぶり (cm) , ϕ : 鉄筋径 (cm)

劣化予測の構築（加速期-前期）

◆ 鋼材の断面減少率の算出方法

A手法 進展期の評価式の7倍 $q = 0.092 \cdot e^{\{(0.0423 \cdot W/C - 1.5091) \cdot CI\}} \cdot \frac{1}{\sqrt{c}} \times 7$

B手法 次式による（港空研,2001）

$$V_{reduction} = \frac{4ac}{\phi \gamma_{Fe}} e^{\frac{\alpha}{a} t}$$

$V_{reduction}$: 断面減少率（%）, γ_{Fe} : 鉄筋の単位体積質量（= 7.85 mg/mm³）

a : 腐食量とひび割れ幅を関連付ける係数 → 1.5 mg/mm³と仮定

c : 腐食による初期のひび割れ幅 → 0.05 mmと仮定

ϕ : 鉄筋径（mm）

α : 腐食速度とひび割れ幅を関連付ける係数 → 今回は 0.22 mg mm⁻³ year⁻¹と仮定

t : 腐食ひび割れ発生からの年数

C手法 進展期の評価式の7倍 $i = 0.025 \times C(d, t)^{1.5} \times 7$

劣化予測の構築（加速期-後期，劣化期）

【加速期-後期】

✓ 最外縁の鋼材の断面減少率が**10%**に達するまでの期間

【劣化期】

✓ 最外縁の鋼材の断面減少率が**20%**に達するまでの期間

◆ 鋼材の断面減少率の算出方法（加速期-前期と同じ方法による）

A手法

進展期の評価式の7倍 $q = 0.092 \cdot e^{\{(0.0423 \cdot W/C - 1.5091) \cdot C\}^{-1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{c}} \times 7$

B手法

$$V_{reduction} = \frac{4ac}{\phi\gamma_{Fe}} e^{\frac{\alpha}{a}t}$$

C手法

進展期の評価式の7倍 $i = 0.025 \times C(d, t)^{1.5} \times 7$

既存PCポステンT桁橋

新赤石大橋（青森県西津軽郡，ポステン単純PC・T桁橋）



予測結果と既存構造物の劣化の推移との比較

比較対象としたPC橋梁の補修・補強履歴

供用期間	補修・補強内容	
0年	竣工	
22年	第2径間	断面補修工, 外ケーブル補強
24年	第3径間	断面修復工
31年	第2径間	ベント架設

※近隣の宇名原橋は供用16年で劣化が顕在化, 31年で解体撤去



概ね, 10~16年で加速期に達し,
20~30年で劣化期・供用限界に至った
と推測される。

予測結果と既存構造物の劣化の推移との比較

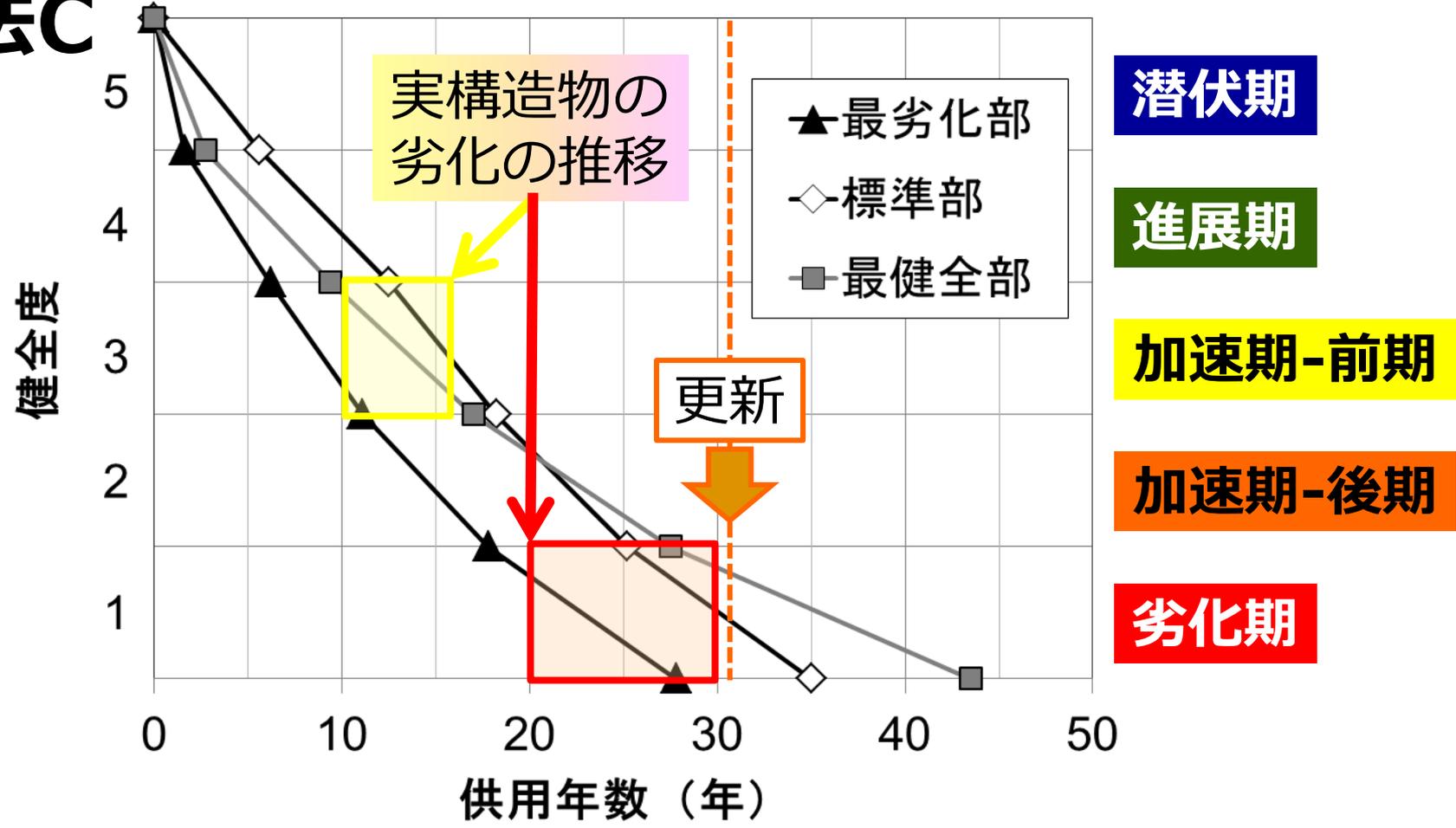
劣化予測のための入力パラメータ（新赤石大橋より取得）

パラメータ	数値		備考
かぶり(mm)	30 mm		設計値
鉄筋径(mm)	13 mm		スターラップ
Cl-の見掛けの 拡散係数 (cm ² /年)	標準※	0.21	JSCE-G 573による コア試料の分析結果
	最劣化部※	0.87	
	最健全部※	0.63	
コンクリート表面 におけるCl-濃度 (kg/m ³)	標準※	23.1	JSCE-G 573による コア試料の分析結果
	最劣化部※	15.4	
	最健全部※	11.0	
水セメント比 (%)	標準※	30.0	Cl-の見掛けの拡散係数から 示方書式にて逆算
	最劣化部※	45.0	
	最健全部※	41.0	

※：目視調査によって判定された劣化の程度

予測結果と既存構造物の劣化の推移との比較

手法C



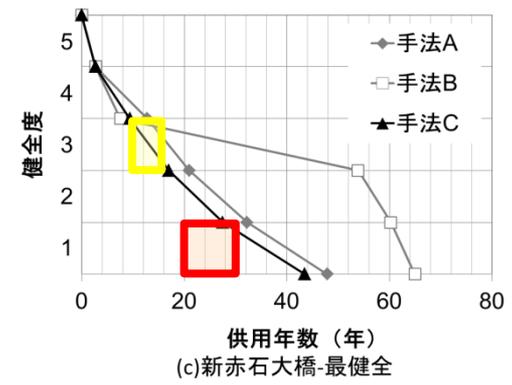
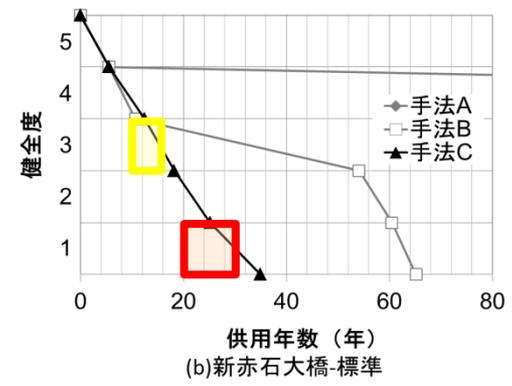
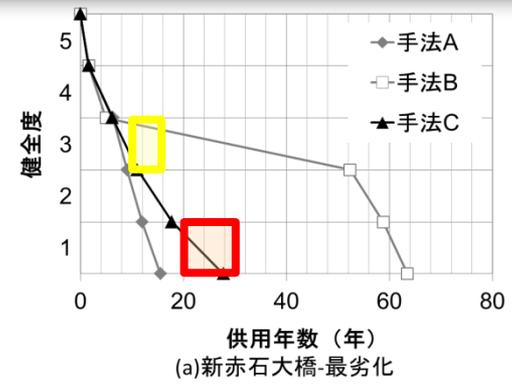
劣化予測結果と既存構造物の劣化の推移がほぼ一致

予測結果と既存構造物の劣化の推移との比較

	劣化度	劣化予測手法		
		A	B	C
加速期	最劣化部	○	○	○
	標準部	×	○	○
	最健全部	○	○	○
劣化期 供用限界	最劣化部	△	×	○
	標準部	×	×	○
	最健全部	△	×	○



手法Cを選定



C_I/T (=初期建設コスト／供用可能年数)による分析

C_I/T : 初期の塩害対策の有効性を1年あたりの経費の多寡で検証

試算対象 :

PCポステンT桁橋の上部工 (6主桁・3径間, 桁長45m, 幅員14m)

$W/C=0.359 \Rightarrow D_{ap}$ は示方書式から算出

環境条件 飛沫帯 : $C_0=13.0 \text{ kg/m}^3$

汀線 : $C_0=9.0 \text{ kg/m}^3$

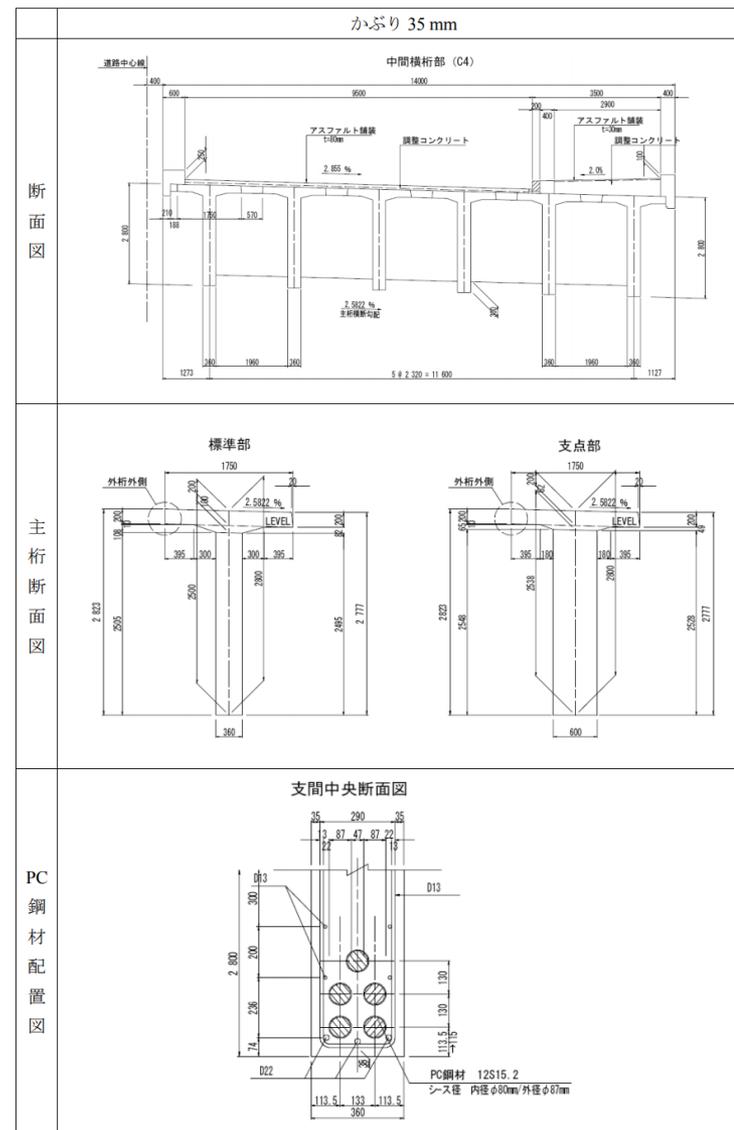
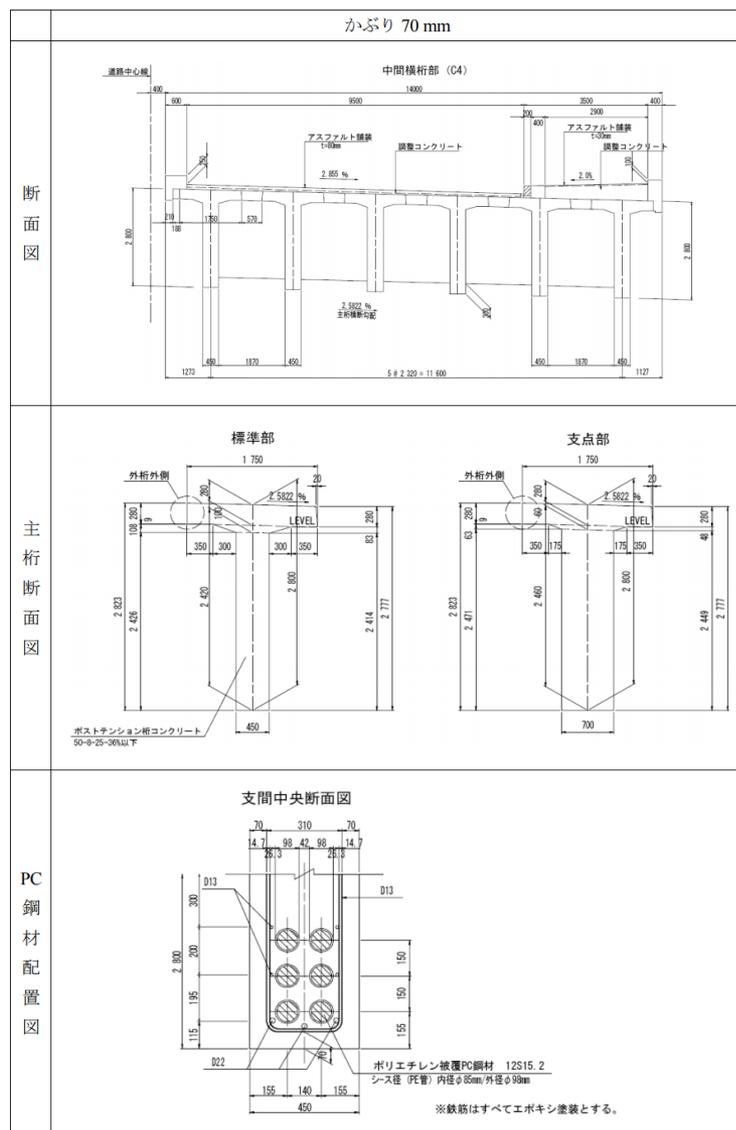
海岸100m : $C_0=4.5 \text{ kg/m}^3$

かぶり 35mm, 70mm

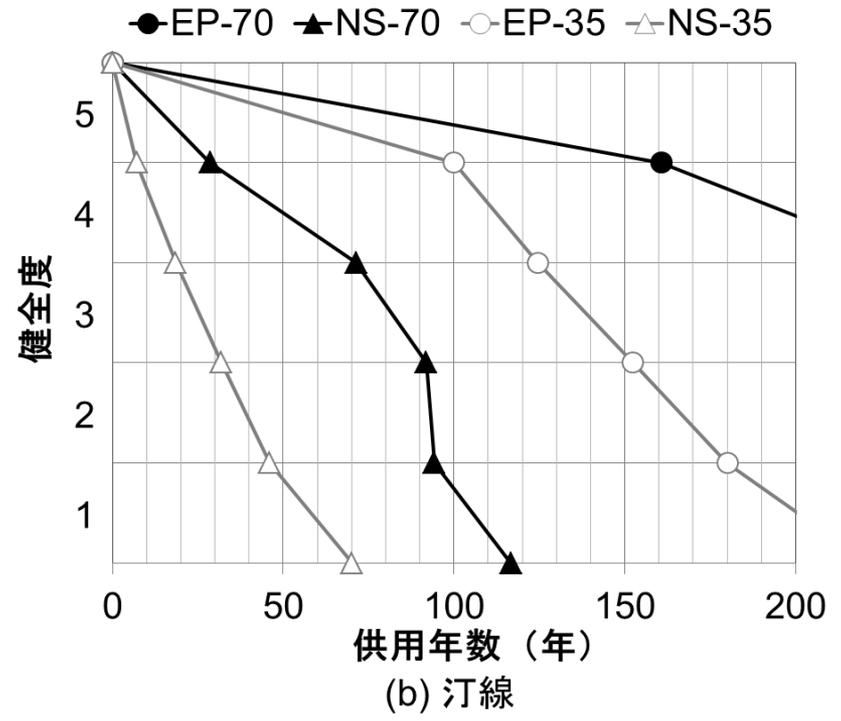
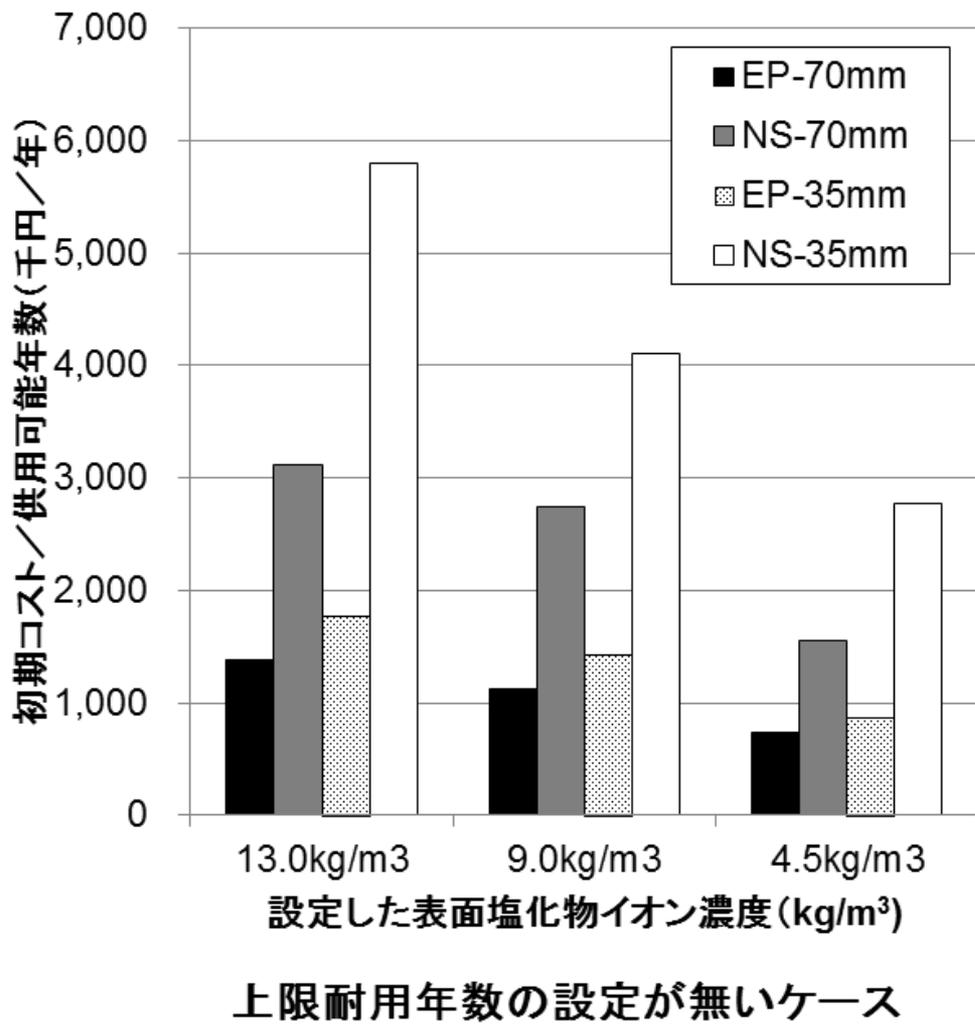
鋼材種類 工ポキシ樹脂塗装鋼材 (EP) , 普通鋼材 (NS)

供用可能年数 : 劣化予測手法により供用限界に達するまでの時間
 \Rightarrow スターラップの断面欠損率20%

試算対象のPC桥梁の断面図



C_1/T (=初期建設コスト/供用可能年数)による分析



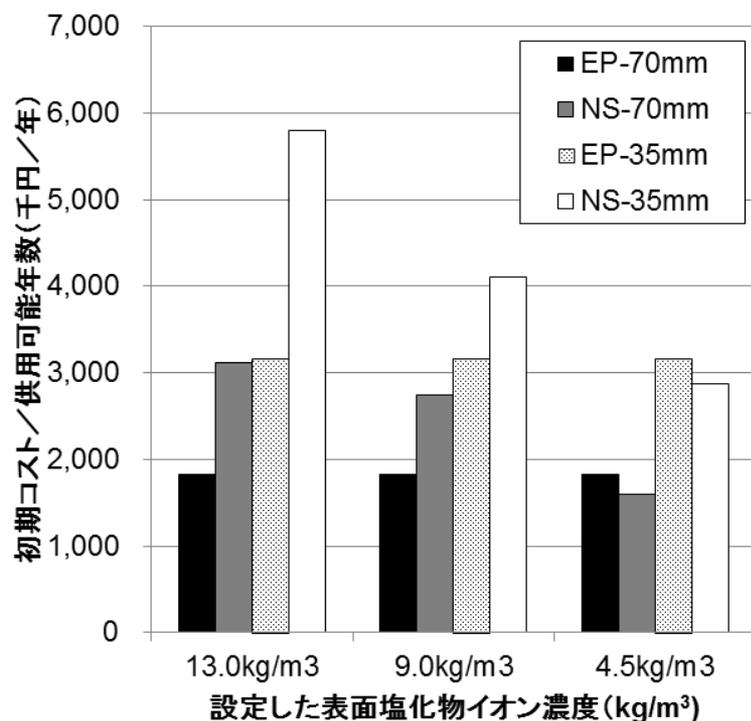
エポキシ樹脂塗装鋼材に優位性



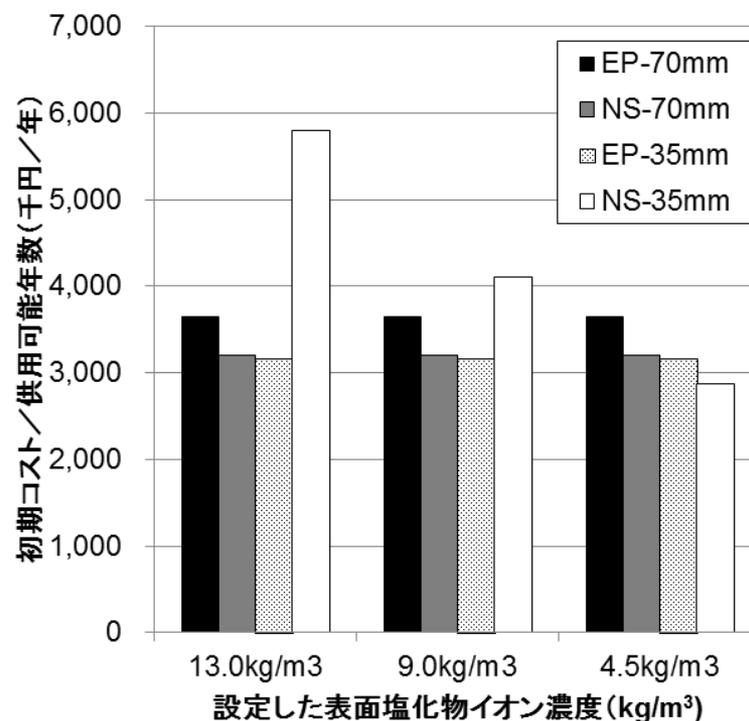
劣化予測による供用可能年数が200年を超えるほど長い
ため (ケースによっては500年)

結果の分析

上限耐用年数200年



上限耐用年数100年



200年⇒エポキシ樹脂塗装鋼材やかぶりの確保による塩害対策に優位性

100年⇒塩害対策がコストの観点からオーバースペックの可能性あり。

※工法の信頼性（不確定要素が少ない）を考慮すると優位性を持つ可能性あり。

LCC試算対象：6主桁・3径間PCポステンT桁橋

※：桁長45m，幅員14m

環境条件※1	かぶり	鋼材	維持管理水準※2	対策
飛沫帯 汀線 海岸から0.1 km	70 mm	エポキシ樹脂塗装鋼材	鋼材腐食を許容しない	全断面修復＋表面被覆
			腐食ひび割れを許容しない	全断面修復＋表面被覆
		普通鋼材	鋼材腐食を許容しない	全断面修復＋表面被覆 電気防食
			腐食ひび割れを許容しない	脱塩工法＋表面被覆
	35 mm	普通鋼材	鋼材腐食を許容しない	全断面修復＋表面被覆 電気防食
			腐食ひび割れを許容しない	脱塩工法＋表面被覆
		普通鋼材	鋼材腐食を許容しない	全断面修復＋表面被覆 電気防食
			腐食ひび割れを許容しない	脱塩工法＋表面被覆

※1：塩分浸透予測に用いる表面塩化物イオン濃度は，以下に示すとおり。

飛沫帯： $C_0=13.0 \text{ kg/m}^3$ ，汀線： $C_0=9.0 \text{ kg/m}^3$ ，海岸から0.1 km： $C_0=4.5 \text{ kg/m}^3$

※2：鋼材腐食を許容しない ⇒ かぶり位置のCl濃度が 1.2 kg/m^3 に達した時点で対策実施
 腐食ひび割れを許容しない ⇒ 腐食ひび割れが発生すると予測された時点で対策実施

補修工法の適用範囲と効果の持続性について

補修工法の適用範囲：桁の下端から上250mm

⇒下フランジには飛来塩分が付着しやすいいため劣化が顕在化しやすく、優先的に補修対象となることが多い。

(1) 断面修復工法 + 表面被覆工法

- ✓ 断面修復はかぶり部分を完全には取り取る。
- ✓ 表面被覆は15～20年毎に塗り替え。効果に変化なし。
- ✓ 補修実施以降はエポキシ樹脂による遮塩性能の効果は消失。

(2) 電気防食工法

- ✓ 陽極システムの寿命は40年。
- ✓ 配線配管および電源装置の寿命は20年。

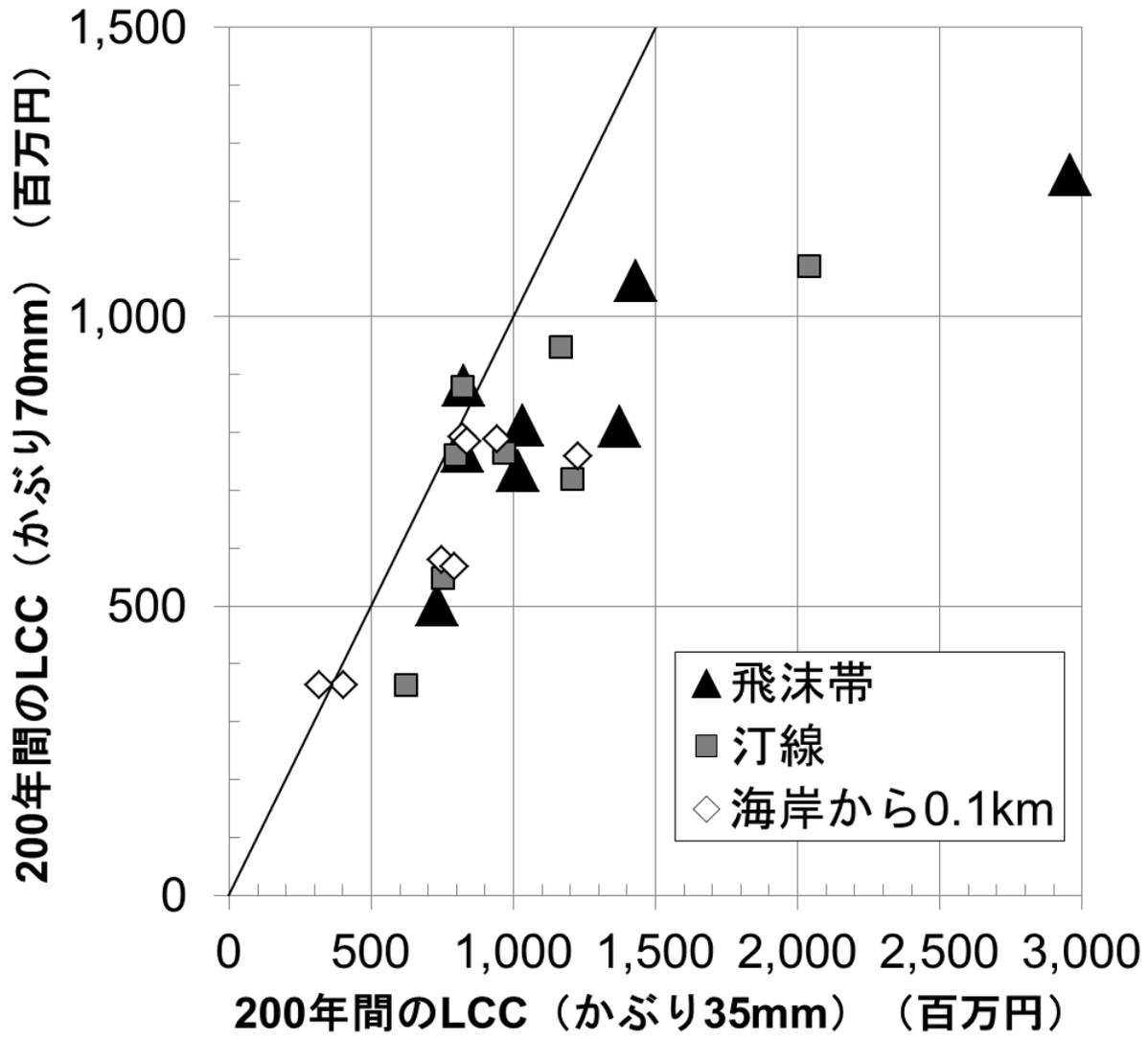
(3) 脱塩工法 + 表面被覆工法

- ✓ 脱塩後のCl⁻濃度は脱塩前の濃度の0.4倍。
- ✓ 脱塩終了後のCl⁻再拡散問題は、等価かぶりの考え方をを用い、Fickの拡散方程式を陽的差分法で解く。

その他の主な条件

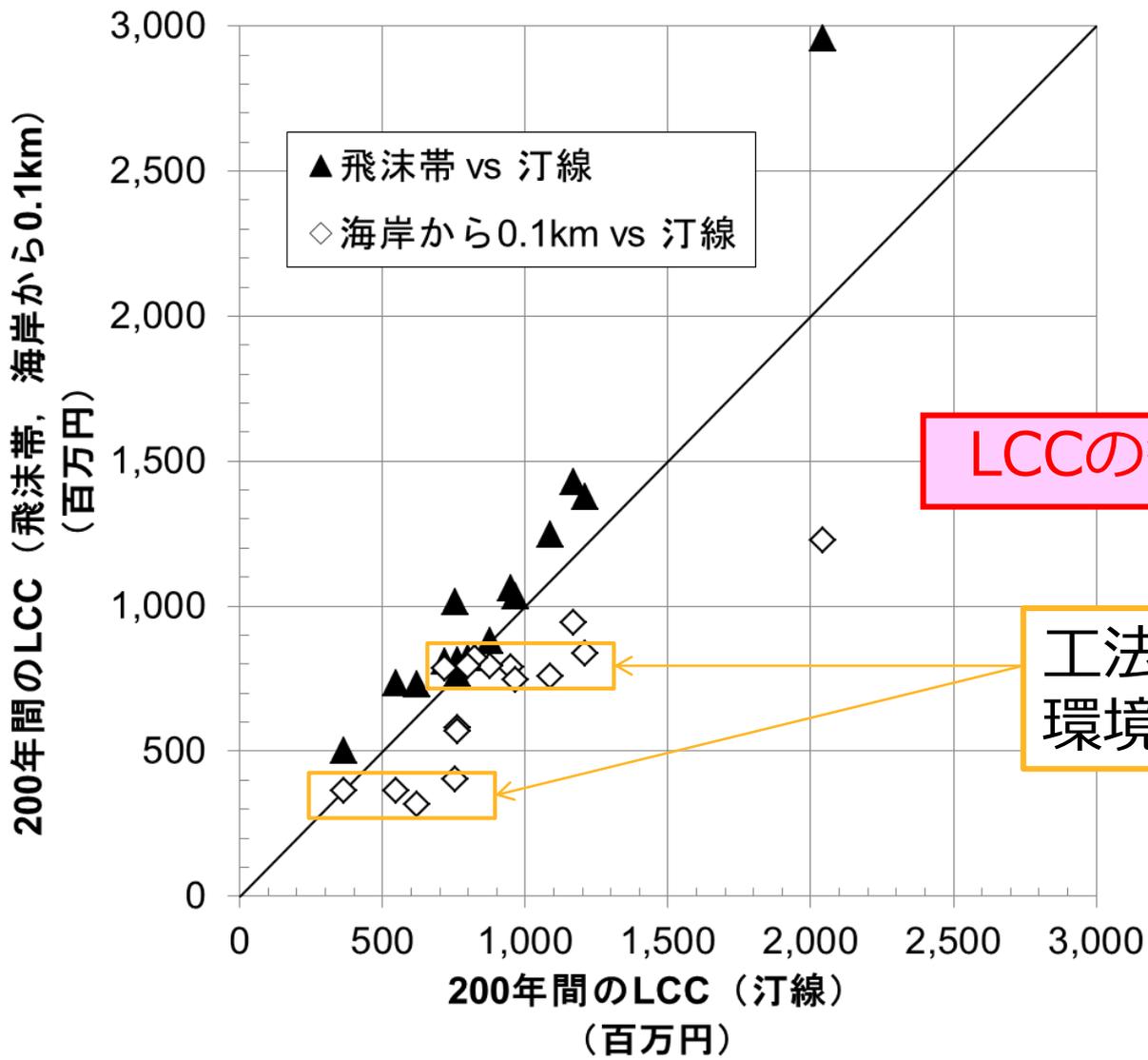
- ✓ 割引率は0.
- ✓ 対象期間は最長で200年.
- ✓ 予定供用期間が残り5年となった時点で補修が必要と判定された場合⇒補修対策を実施しない.
- ✓ 表面被覆材の寿命が断面修復工法および脱塩工法の再補修の直近5年以内に達した場合⇒表面被覆材の塗り替えは実施しない（断面修復工法，脱塩工法の再補修時に塗り替え）.
- ✓ コストは上部工の直接工事費のみ．補修費用は港湾空港研報告書を参考にした（表-5）．

結果分析 (200年間のLCCによる評価)



かぶりの確保
↓
補修を前提とした維持
管理シナリオでもLCC
低減効果あり.

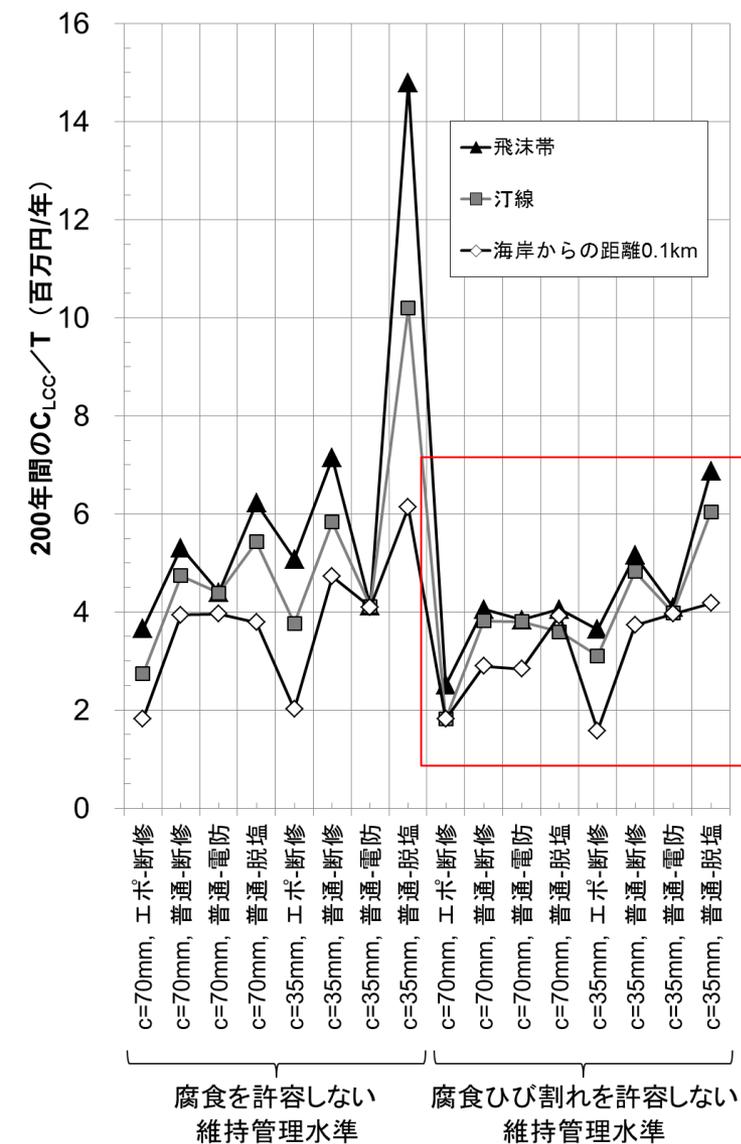
結果分析 (200年間のLCCによる評価)



LCCの多寡≒環境作用の強弱

工法によるLCCの差異は環境条件によって変化する

結果分析（200年間のLCCによる評価）



◆ エポキシ樹脂塗装鋼材の使用

➤ LCCの観点から有利

◆ 普通鋼材を使用したケース

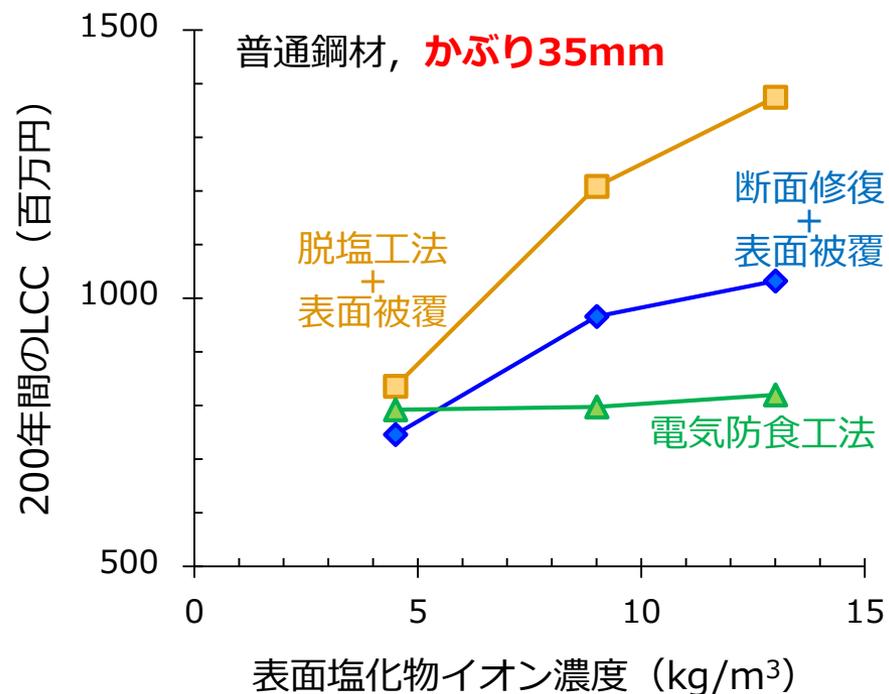
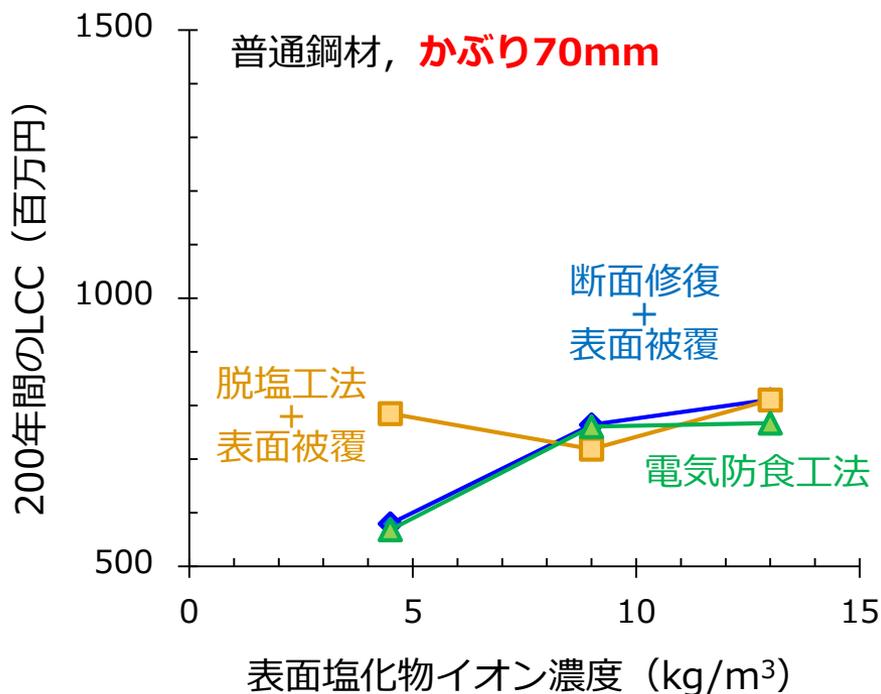
➤ 補修対策工法の優劣は

- 建設時の塩害対策
- 環境条件

・・・によって変化

次のスライドで詳細に分析

LCCの影響要因



- ✓ 環境が厳しく, かぶりが小さいと, LCCは増加
- ✓ かぶりが小さいと, 環境が厳しくなるほど工法の差異が明確になる.

まとめ ～ LCCの観点から…

※注意

- ✓ 工法の劣化予測，維持管理シナリオ，詳細な設計条件によっては，LCCの試算結果が変化.
- ✓ そもそも工法の適用範囲は？

※今回の試算結果のまとめ

- ✓ 新設時の塩害対策（防錆鋼材の使用，かぶりの確保）は有効.
- ✓ かぶりを確保すれば，補修を前提とした維持管理シナリオでもLCCを低減するケースはある.
- ✓ LCCは補修工法他に，環境条件の影響を受ける.
 - ⇒ 環境作用の強さの把握
 - ⇒ 環境作用の強さに応じた補修工法の選択
～塩化物イオンの作用が強ければ，電気防食が有効

電気防食工法の信頼性の確保に向けた取組み ⇒撤去PC桁の調査事例

※この内容の一部は土木研究所共同研究報告書に記載されています。

電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する共同研究報告書
－電気防食工法の維持管理の課題に関する研究成果－

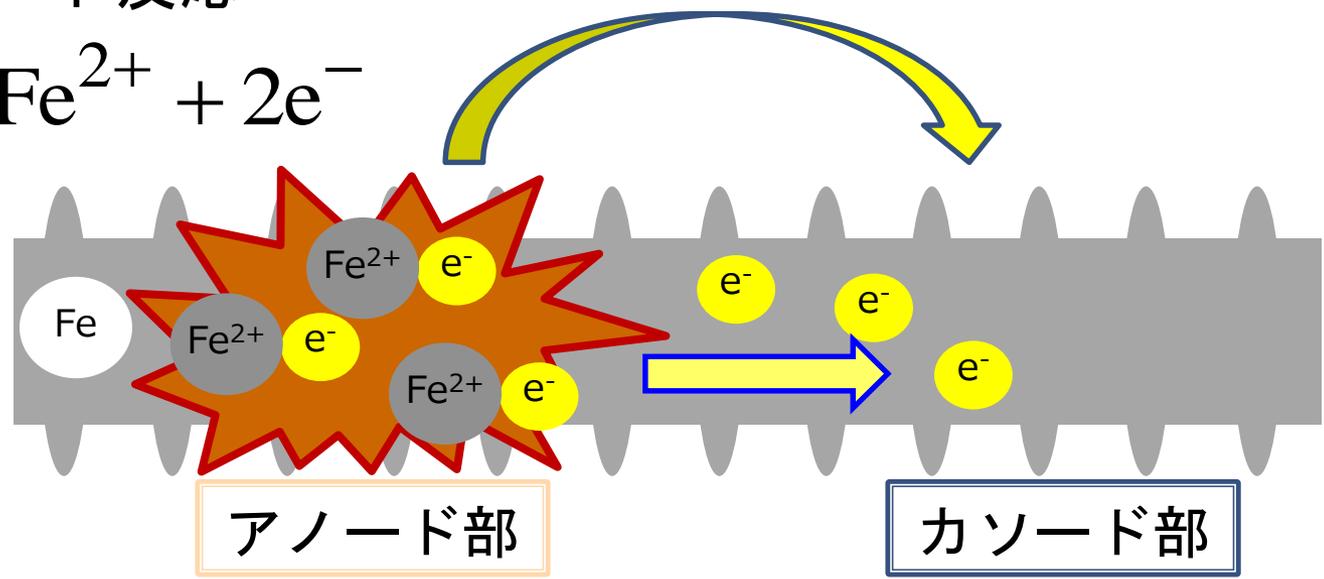
<https://www.pwri.go.jp/team/imarrc/research/tech-info/co502.pdf>

鋼材の腐食のメカニズム（腐食電池）

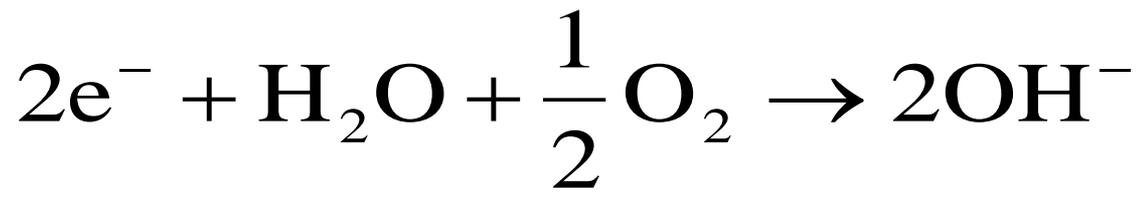
アノード反応



腐食電流



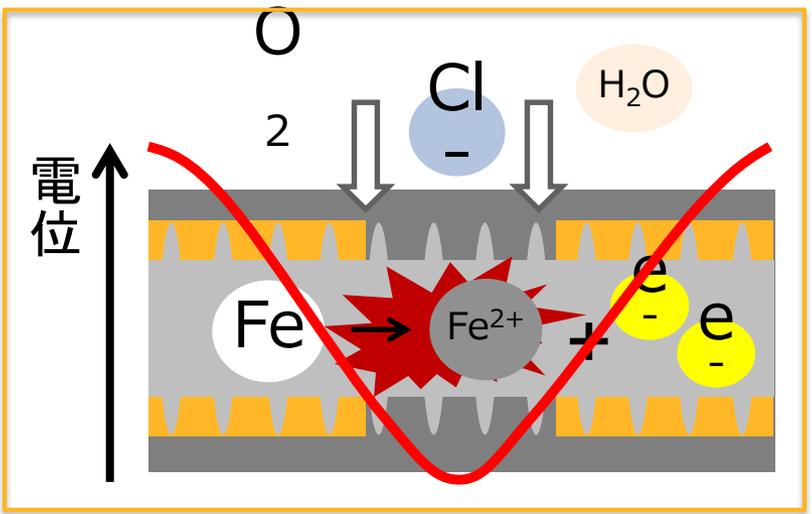
カソード反応



電気防食による防食のメカニズム

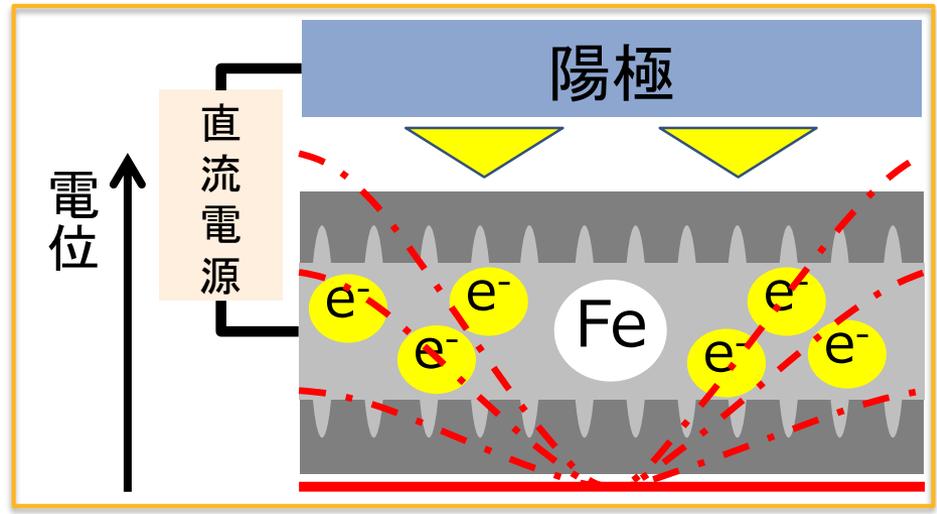
腐食原理

- ✓ Cl⁻により不動態皮膜が破壊される
 - ✓ アノード反応・カソード反応により、電位差が生じ腐食電流が流れる
- ⇒ 腐食が発生する



防食原理

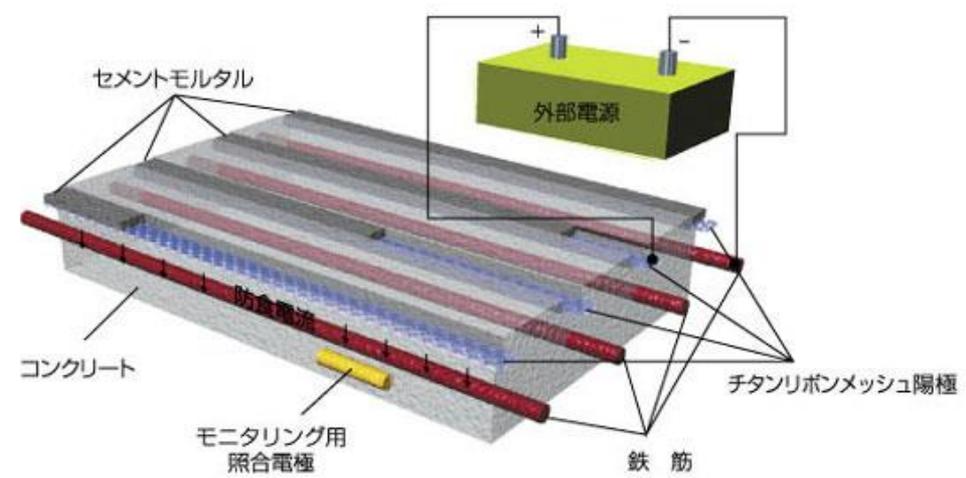
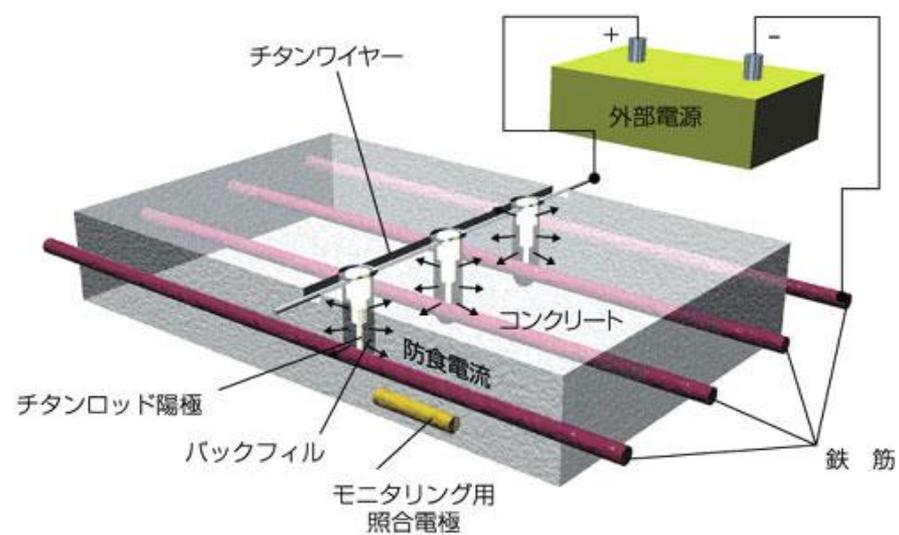
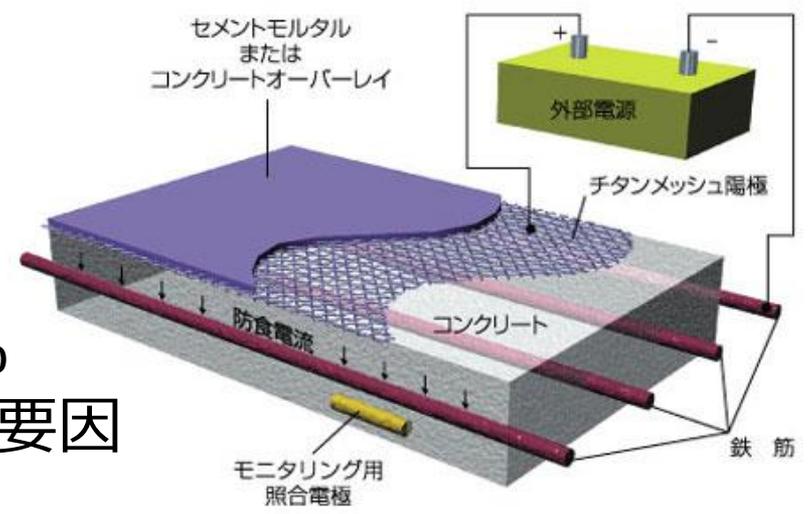
- ✓ 鋼材に電子を供給する
 - ✓ 鋼材表面でカソード反応が生じ、鉄がイオン化しない
- ⇒ 腐食を制御
(陽極がアノードになる)



腐食反応そのものを制御するため、
他工法と比較して再劣化のリスクが極めて低い

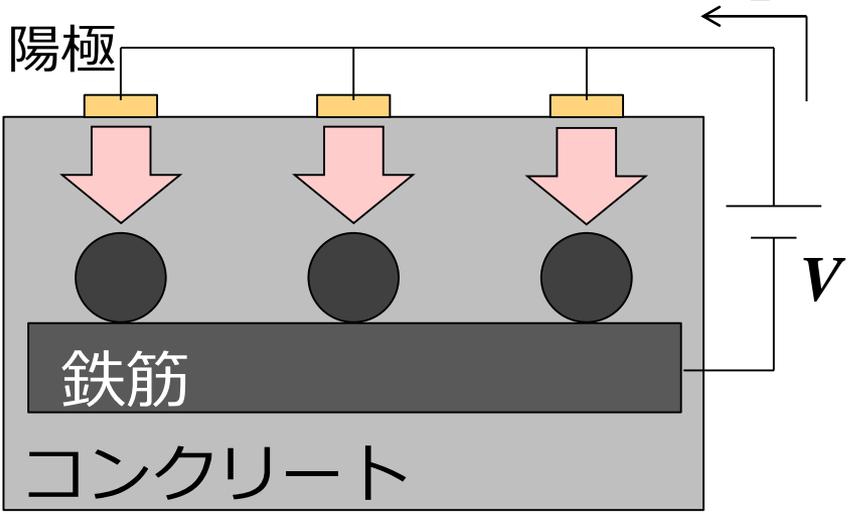
電気防食工法の種類とコスト

- ✓ 陽極の形状によって分類
⇒面状・線状・点状
- ✓ 施工費は7~10万円/m²
うち、陽極材の材料費は約20%
⇒線状陽極方式の採用が多い要因

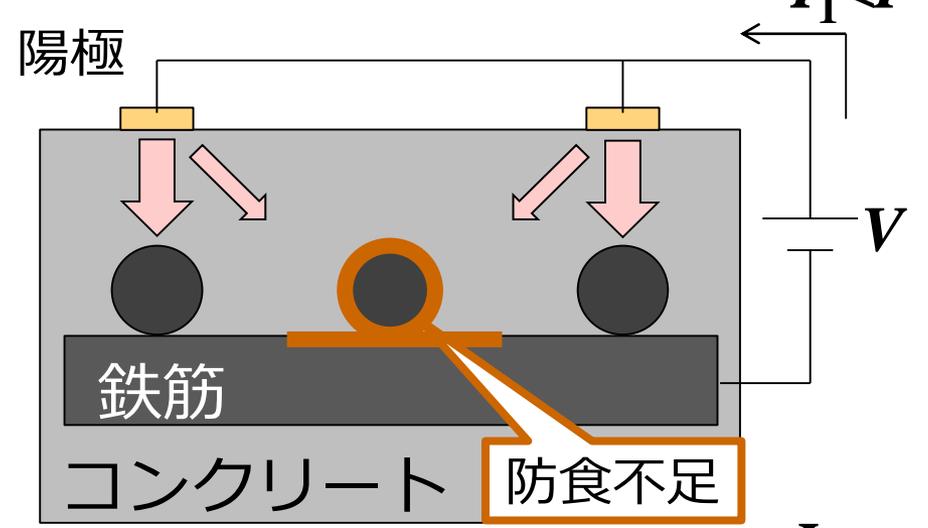


防食電流の分布

【陽極量と配置が適切】

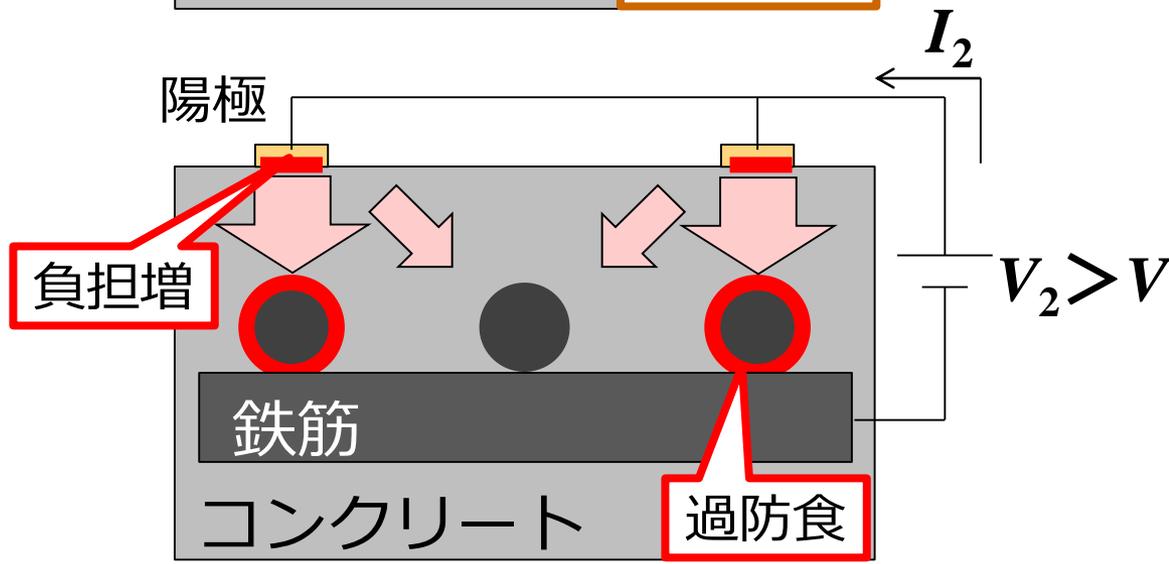


【陽極量が少ない】



陽極配置の設計

- 防食性能
- 陽極材の寿命
- 経済性



陽極配置の設計支援 ～ 有限要素法による解析

★鋼材表面に流入する電流分布・分極量分布の評価

境界条件 (コンクリート表面)

(陽極表面)

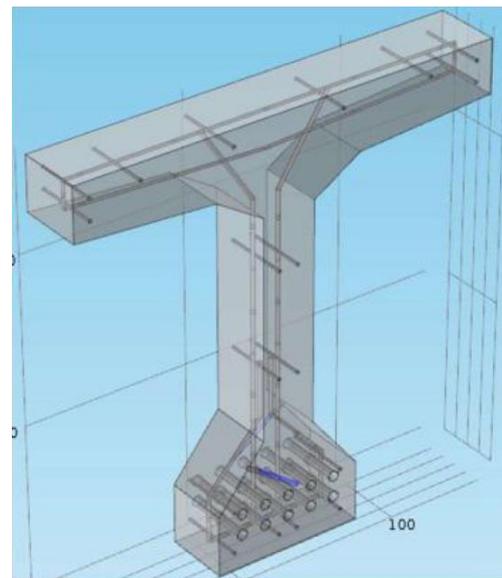
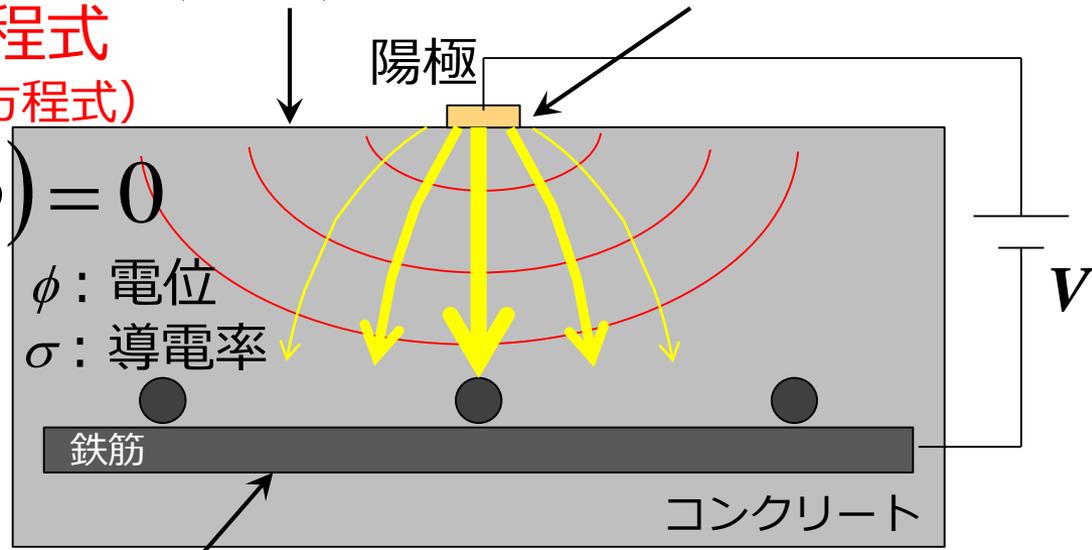
$$n(\sigma \nabla \phi) = 0$$

$$E_a = E_{0a} + E_{ab} + i \cdot R_a$$

支配方程式
(ラプラス方程式)

$$\nabla(\sigma \nabla \phi) = 0$$

ϕ : 電位
 σ : 導電率



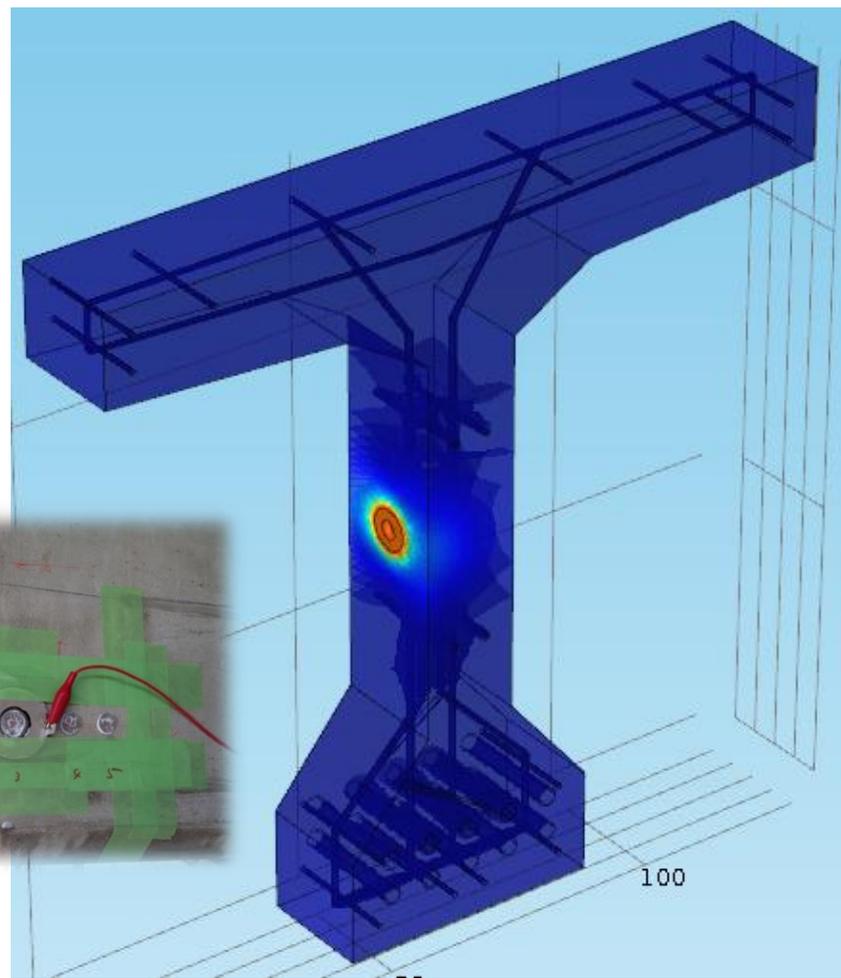
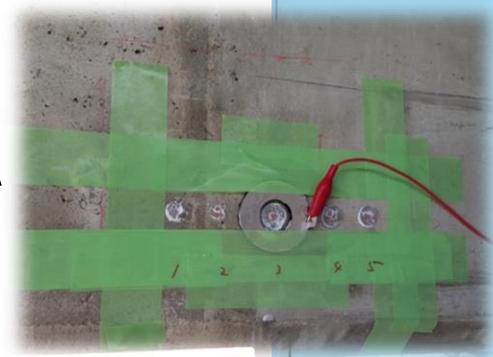
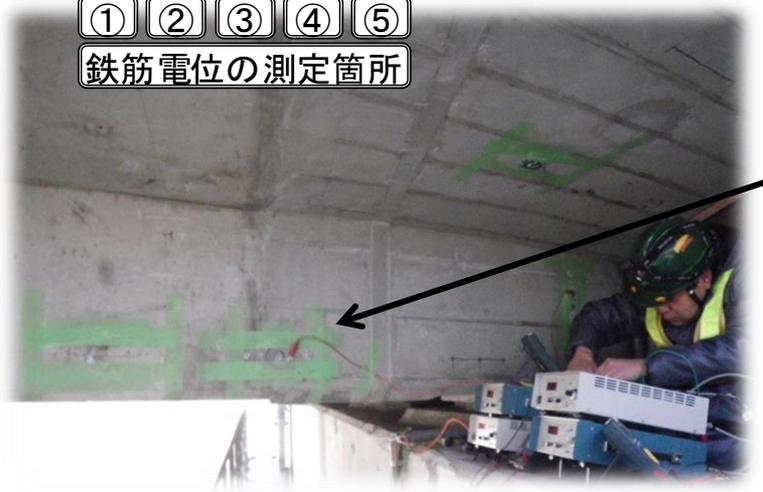
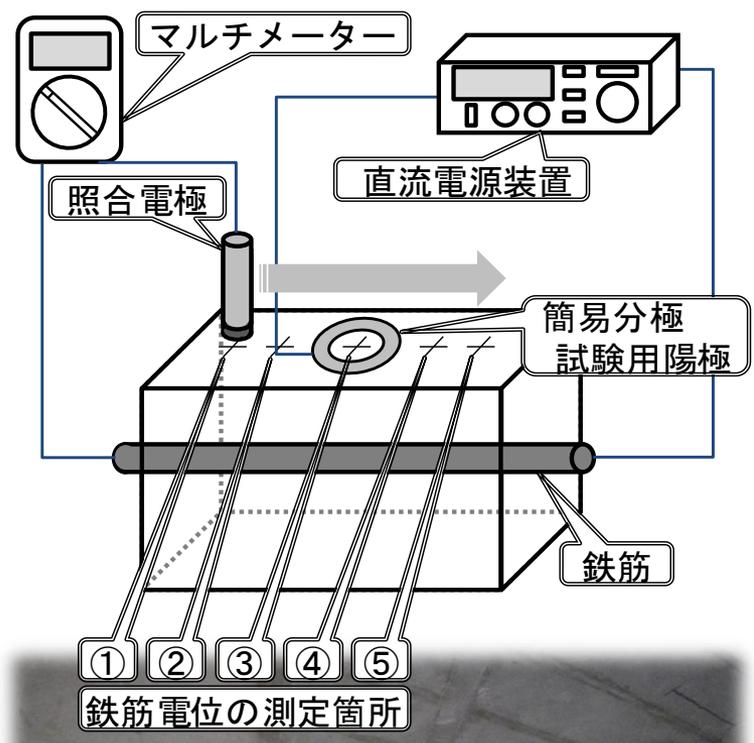
境界条件 (鉄筋)

$$E_c = E_{0c} - E_{cb} - i \cdot R_c$$

n : 絶縁壁の法線ベクトル, i : 電流密度 [A/m²]
 E_c, E_a : 電極電位 [V], E_{0c}, E_{0a} : 自然電位 [V]
 E_{cb}, E_{ab} : バイアス電位 [V], R_c, R_a : 分極抵抗 [Ω m²]

現地試験で取得 = 簡易分極試験

簡易分極試験 (現地試験)



撤去桁の調査

- ✓ 2径間ポストテンションT桁橋
- ✓ 飛来塩分による塩害 ($C_{0,max} = 15.4 \text{ kg/m}^3$) が顕在化, 電気防食を適用
- ✓ 桁中央付近の下フランジを中心にひび割れや剥離などの再劣化が顕在化

注：手前の鋼桁の奥にPC橋梁が架設されていた。



下フランジ底面の剥離



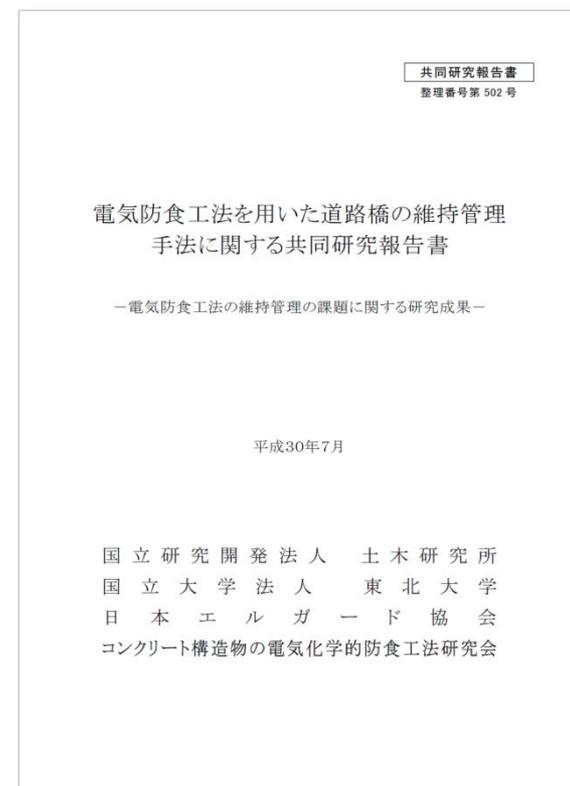
共同研究

電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する共同研究報告書 －電気防食工法の維持管理の課題に関する研究成果－

<https://www.pwri.go.jp/team/imarrc/research/tech-info/co502.pdf>

土木研究所，東北大学，日本エルガード協会
コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会

- 1編 序論
- 2編 電気防食工法の現状
- 3編 電気防食工法の維持管理の実態調査
- 4編 供用中の橋梁の調査
- 5編 撤去橋梁の調査
- 6編 維持管理マニュアル(案)の策定
- 7編 新工法の開発（間欠通電方式の検証）
- 8編 結論



共同研究

電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する共同研究報告書 －電気防食工法の維持管理の課題に関する研究成果－

<https://www.pwri.go.jp/team/imarrc/research/tech-info/co502.pdf>

5編 撤去橋梁の調査

1. はじめに

2. 荒磯橋の概要

2.1 書類調査

2.2 防食回路および運転状況

3. 撤去桁の調査結果

3.1 撤去桁の現状把握のための調査

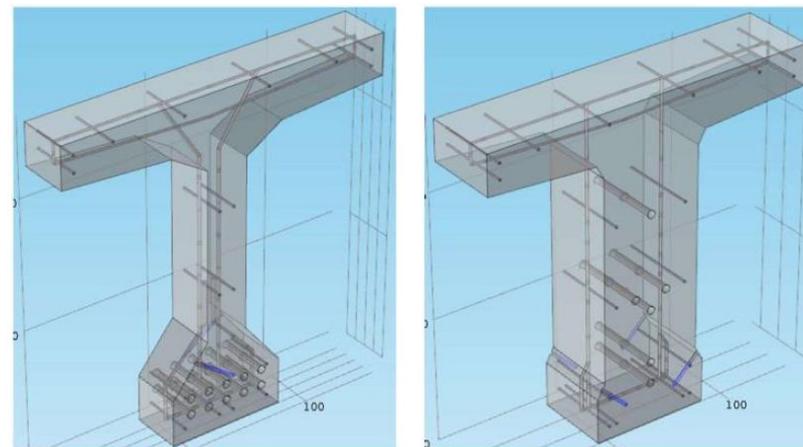
3.2 詳細調査

4. FEMによる防食効果の評価

4.1 FEMの概要と入力パラメータの決定

4.2 解析結果と実測値との比較

5. 調査結果のまとめと本検討から得られた知見



維持管理の履歴

年度	補修・補強履歴	変状の目視確認の履歴
1965年	竣工	
1979年	落橋防止装置	
1982年	高欄・防護柵	
1985年	伸縮装置取替え	
1988年	橋梁拡幅	
1997年	断面修復（はつり調査の埋戻し）	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 一部の桁の一部に橋軸方向のひび割れと剥離を確認. ✓ PC鋼線の腐食・破断を確認.
1999年	脱塩工（下部工） 断面修復 電気防食工（既設部上部工） 伸縮装置取替え・外ケーブル 舗装・排水施設 表面塗装（拡幅部）	
2001年		✓ 防食状態は良好。
2002年		✓ 防食状態は良好。
2003年	はつり調査部について断面修復	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 鋼材腐食に起因するひび割れ・浮きを確認. ✓ 埋めこみ照合電極による復極量は100 mV以上 = 防食規準を満足. ✓ 浮部周囲の復極量は100 mVより小さい.

維持管理の履歴

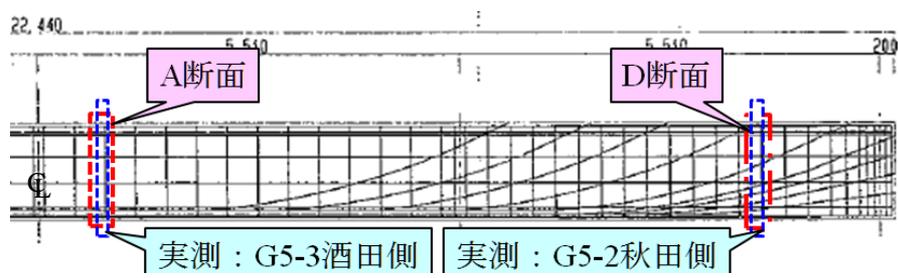
年度	補修・補強履歴	変状の目視確認の履歴
2004年	橋面防水工	
2010年		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 防食対象の下フランジに設置された埋め込み型照合電極により測定した復極量は、下フランジ下面において100 mV未満になるものがあった。 ✓ 安定した電位を示さない照合電極が一部で確認された。 ✓ H21年度の橋梁定期点検結果と今年度の現地踏査結果を比較しており、損傷が著しく進行していること、特に、補修した断面修復材が浮いて、その後剥落して剥離・鉄筋露出に至っていることを指摘している。
2014年	撤去。土木研究所へ移設。	

要因として考えられること

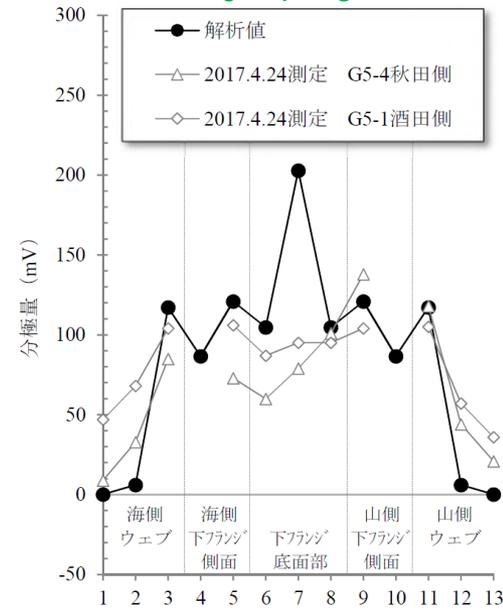
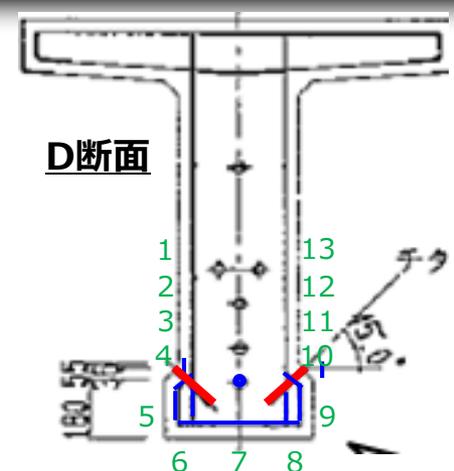
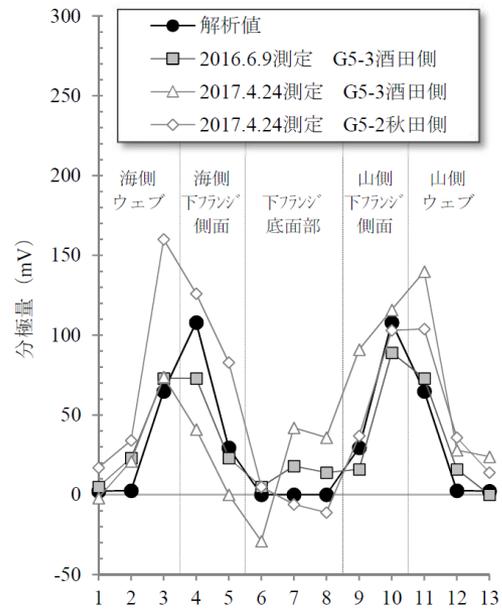
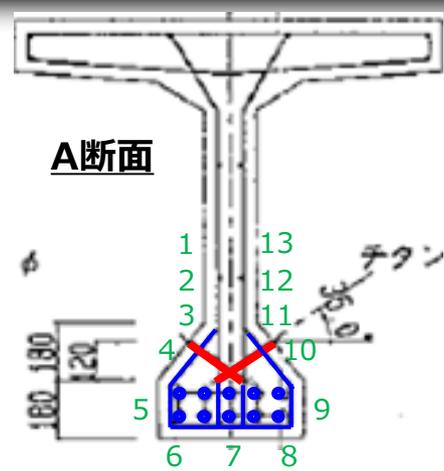
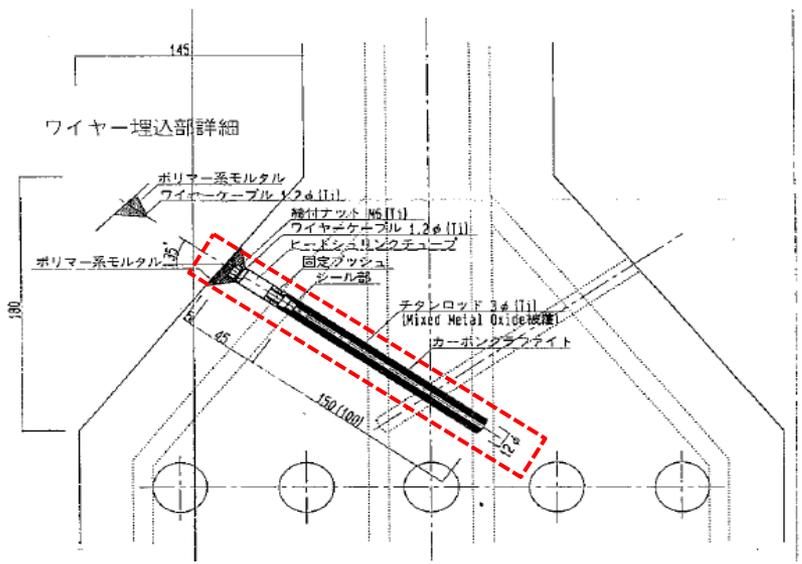
- ◆ 陽極からコンクリート中鋼材への防食電流の分布
 - ✓ 陽極配置
 - ✓ コンクリート母材および断面修復材の電気抵抗率の上昇
 - ◆ 電源装置から陽極への防食電流の分配機能
 - ✓ ディストリビュータの結線
 - ◆ モニタリング（照合電極）位置
 - ◆ 桁毎あるいは部位毎の劣化外力の差異
 - ✓ 鋼材量の空間分布
 - ✓ 環境作用の分布
- } 健全部と非健全部が存在する要因

防食電流の分布 ~ 陽極配置

桁側面図



陽極の設置方法：点状陽極方式



対策：①面状or線状陽極方式で外側から防食電流を供給，②設計でのFEMの援用

防食電流供給量の変化 ～ 電気抵抗率の上昇

年度	補修履歴	変状の目視確認の履歴
1965年	竣工	
1997年	断面修復（はつり調査の埋戻し）	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 一部の桁の一部に橋軸方向のひび割れと剥離. ✓ PC鋼線の腐食・破断を確認.
1999年	既設部上部工・補修： 断面修復，電気防食工，排水施設	
2002年		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 防食状態は良好。
2003年	はつり調査部について断面修復	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 鋼材腐食に起因するひび割れ・浮きを確認. ✓ モニタリングポイントでの復極量は100 mV以上=防食規準を満足. ✓ 浮部周囲の復極量は100 mVより小さい.
2004年	橋面防水工	
2010年		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 下フランジ下面のモニタリングポイントで復極量が100 mV未満 ✓ 鋼材腐食に伴う損傷の進行を確認.
2014年	撤去。土木研究所へ移設.	

推定原因：乾燥 ⇒ 電気抵抗率の増加 ⇒ 防食電流の低下

対策：まずは、止水から。止水は上側から。（今回のケースでは防食を優先せざるを得ず…）

電流分配機能 ～ ディストリビュータの結線

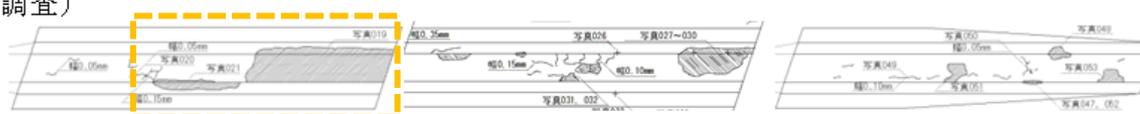
←酒田側 G5-1 G5-2 G5-3 G5-4 秋田側→

G5桁下フランジ部断面修復状況（施工記録より）

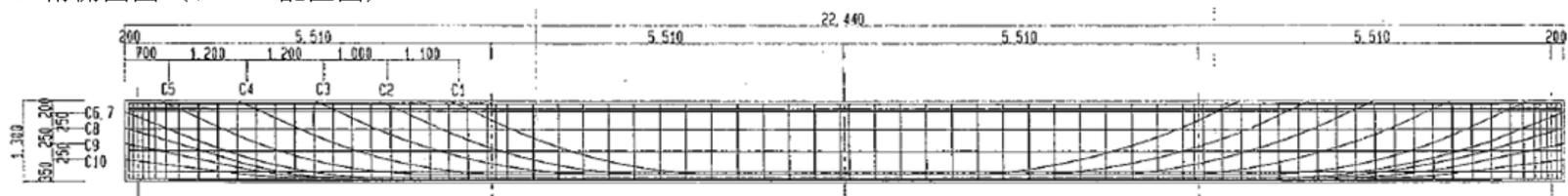


G5桁下フランジ変状図（撤去後の調査）

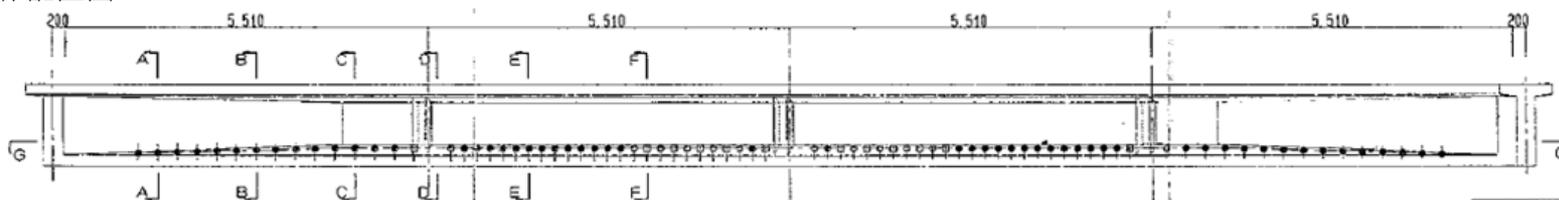
G5-1は
変状図なし



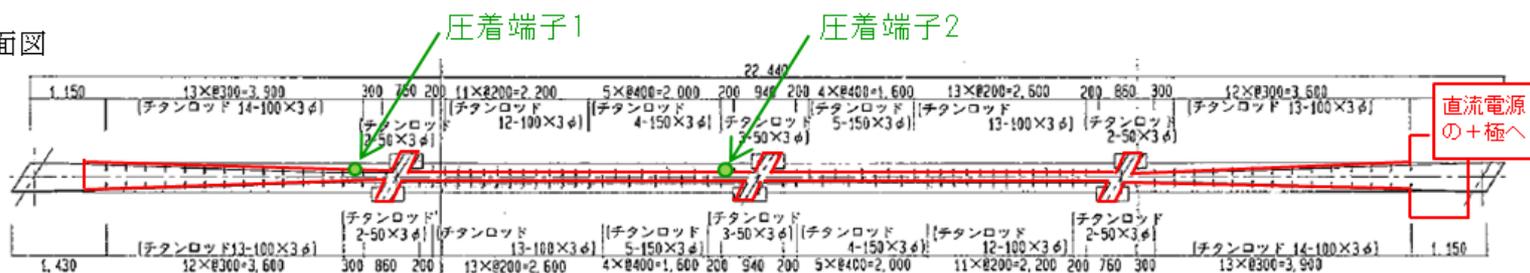
G5桁側面図（シース配置図）



陽極棒配置図



G-G断面図



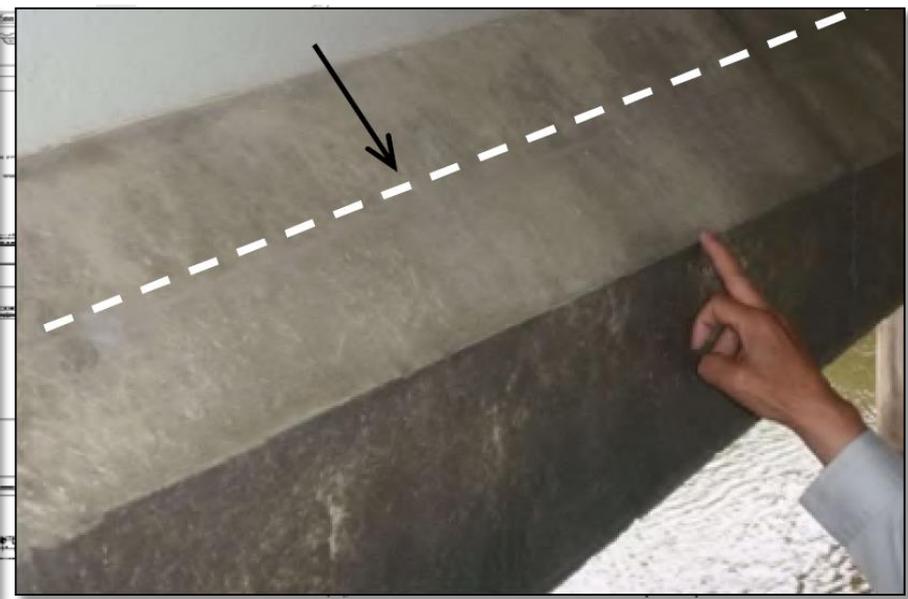
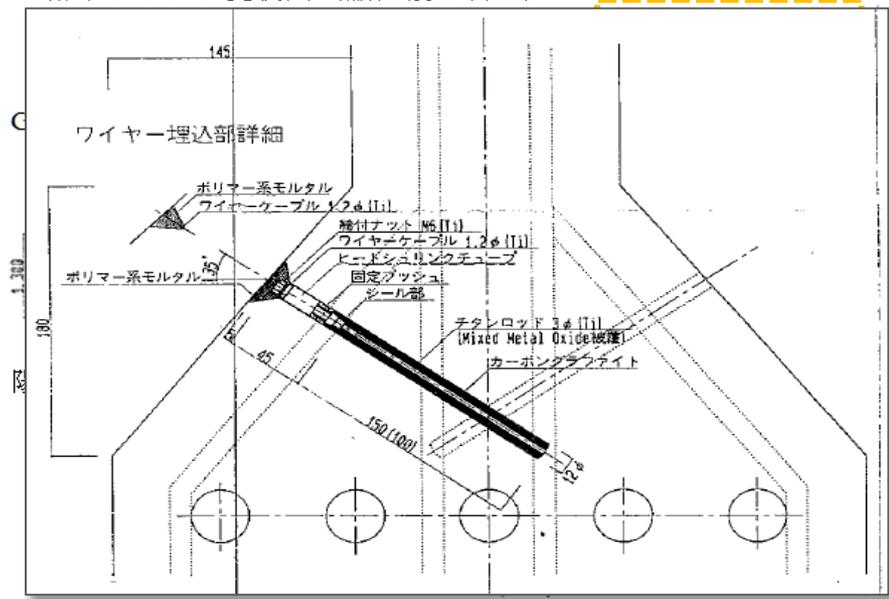
電流分配機能 ~ ディストリビュータの結線

←酒田側 G5-1 G5-2 G5-3 G5-4 秋田側→

G5桁下フランジ部断面修復状況 (施工記録より)



G5桁下フランジ変状図 (撤去後の調査)



G-G断面図



電流分配機能 ~ ディストリビュータの結線

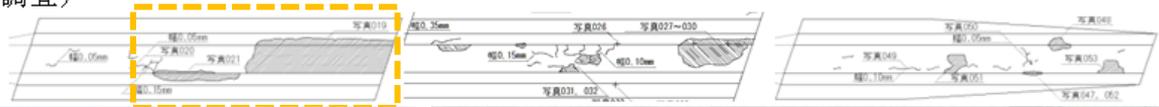
←酒田側 G5-1 G5-2 G5-3 G5-4 秋田側→

G5桁下フランジ部断面修復状況 (施工記録より)

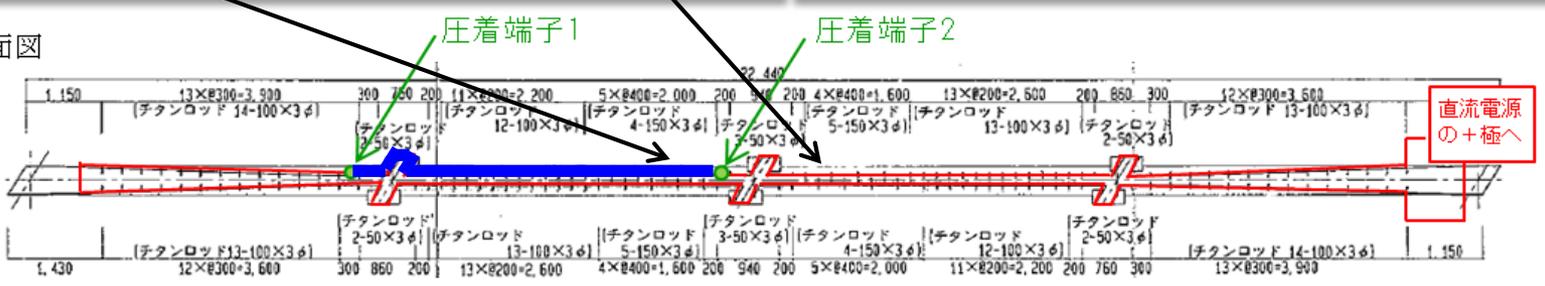


G5桁下フランジ変状図 (撤去後の調査)

G5-1は
変状図なし



G-G断面図



電流分配機能 ～ ディストリビュータの結線

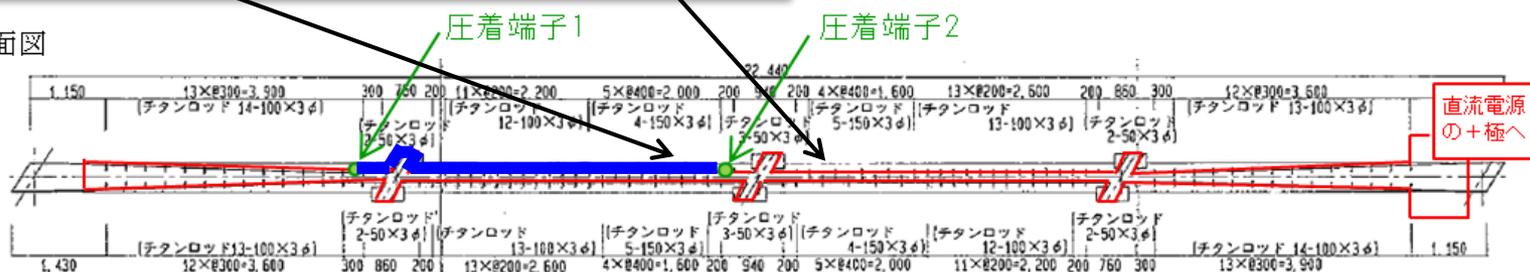
←酒田側 G5-1 G5-2 G5-3 G5-4 秋田側→
G5桁下フランジ部断面修復状況（施工記録より）



G5桁下フランジ部
対策：配線・配管は重要部材。
結線部で異種金属接触を避ける。隙間腐食を防ぐ措置。

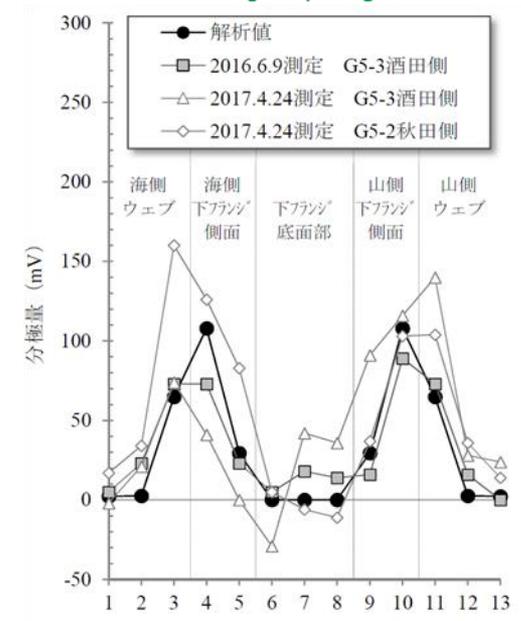
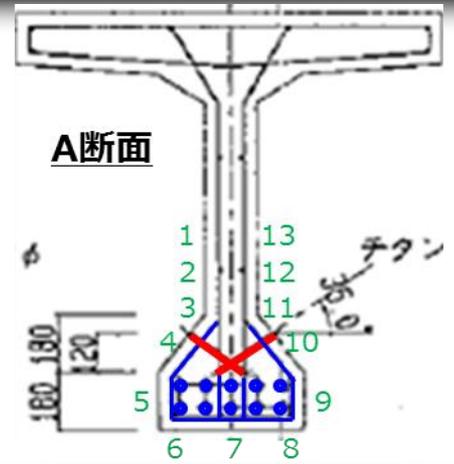
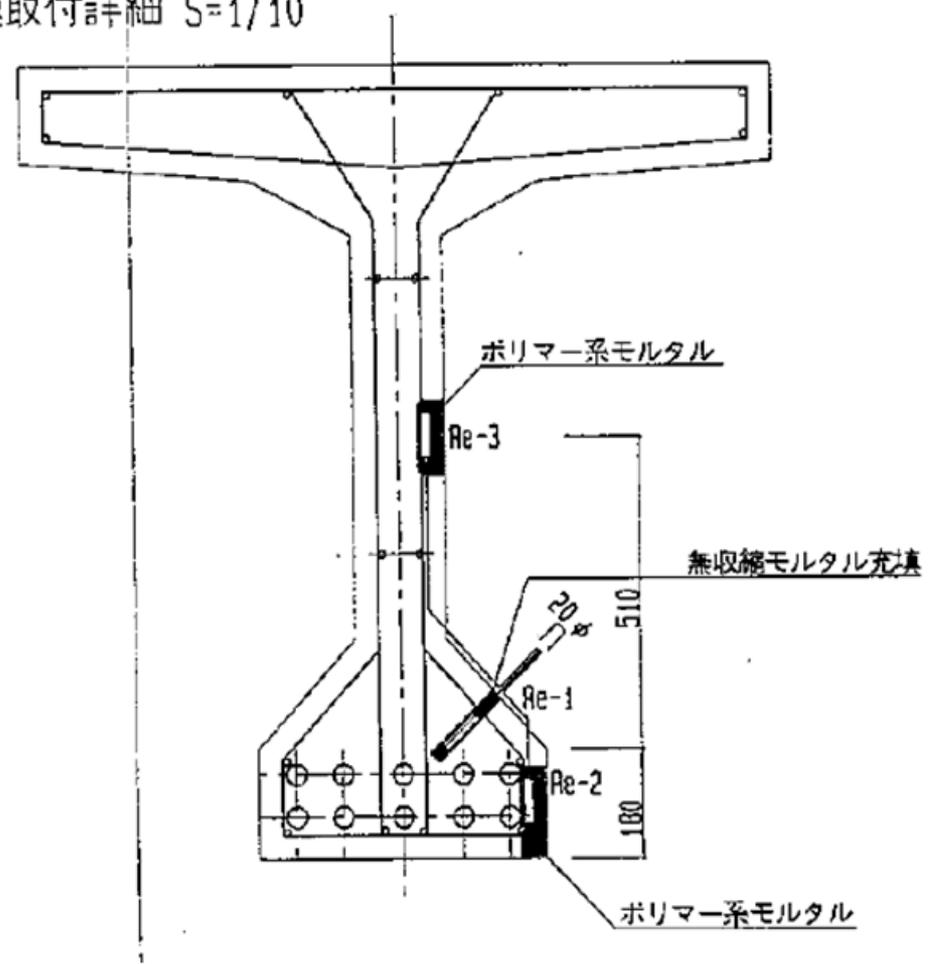


G-G断面図



モニタリング（照合電極）位置

照合電極取付詳細 S=1/10



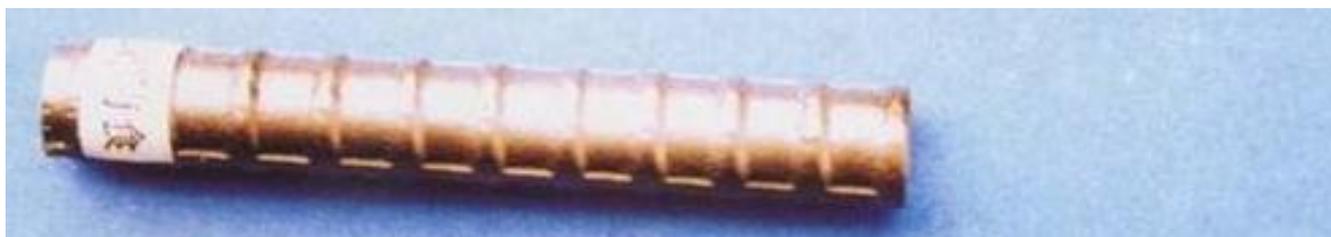
対策：防食電流が最も届きにくい部位に照合電極を設置。⇒FEMで位置を特定

電気防食工法の効果

暴露12年後の鉄筋表面状態観察結果



無防食



電気防食

※出典：建設省土木研究所 共同研究報告書第256号 平成12年

防食電流の供給

- ①面状or線状陽極方式で外側から防食電流を供給，②設計でのFEMの援用

適切な止水工

- ①まずは，止水．止水は上側から．②可能であれば，電気抵抗率の予測

配線・配管は重要部材

- ①結線部で異種金属接触を避ける．②隙間腐食を防ぐ措置．

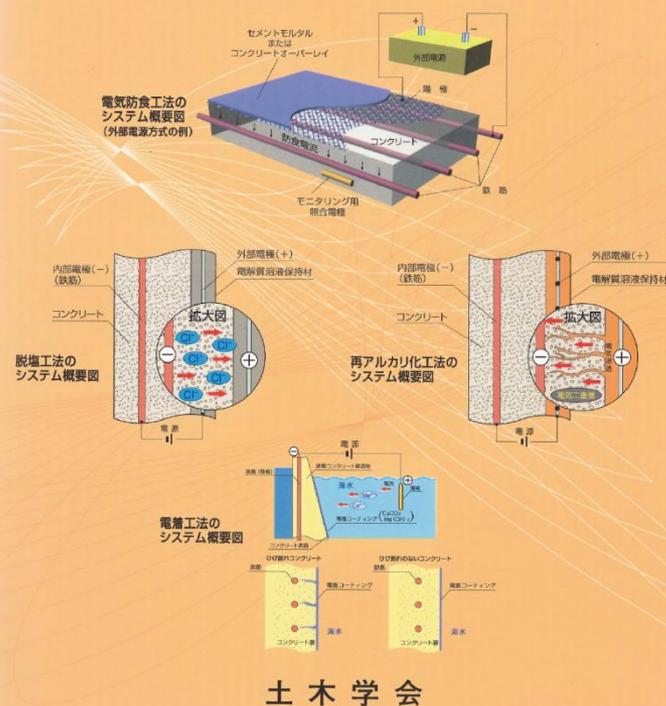
適切なモニタリング位置の決定

- 防食電流が最も届きにくい部位に照合電極を設置．⇒FEMで位置を特定

土木学会 設計施工指針の改訂

107 コンクリートライブラリー

電気化学的防食工法 設計施工指針(案)



土木学会 コンクリート委員会

258電気化学的防食工法設計施工指針改訂小委員会

顧問 宮川 豊章 (京都大学)

委員長 武若 耕司 (鹿児島大学)

副委員長 濱田 秀則 (九州大学)

幹事長 山口 明伸 (鹿児島大学)

副幹事長 守分 敦郎 (東亜建設工業(株))

幹事 上田 隆雄 (徳島大学)

幹事 加藤 佳孝 (東京理科大学)

幹事 皆川 浩 (東北大学)

幹事 内藤 英晴 (五洋建設(株))

幹事 羽濑 貴士 (CP工法研究会)

幹事 山本 誠 (日本エルガード協会)

幹事 若杉三紀夫 ((株)ケミカル工事)

委員37名

2001年(平成13年) 発行